

GPS 地形变测量和 Kaiser 效应法地应力测量在云南昆明—玉溪地区及邻区大震跟踪应用研究*

黄永祥¹, 李延兴², 黄浩雄³, 王伶俐¹

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 中国地震局一测中心, 天津 300180;
3. 美国特拉华大学土木系, Newark. DE19716)

摘要: 2000—2001 年川滇地区有大震震情趋势, 应用 GPS 地形变测量 (G), Kaiser 效应法地应力测量 (K) 技术, 采用 GK 联合并网方法, 同步监测云南昆明—玉溪地区及邻区地形变场、地应力场; 依托本构定律及岩石学组合判据, 进行发震应力条件、发震几率、震级大小的分析研究; 得出云南地区 3~5 年内不具备发生 $M_s \geq 7.0$ 大震的发震应力条件; 同时划出滇东北形变高值区, 10 年左右有可能发生 $M_s 6.0 \sim 7.0$ 地震。

关键词: GPS 地形变测量; Kaiser 效应法地应力测量; 联合并网; 同步监测; 地形变场; 地应力场; 本构定律; 岩石力学判据组合; 发震应力条件; 大震跟踪

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)03-0344-10

0 前言

云南是我国地震活动最显著的地区之一, 在 20 世纪内该区发生 5 级以上地震近 400 次, 其中 7 级以上的大地震就有 13 次 (皇甫岗等, 2000)。1999—2002 年云南境内大范围出现中强震连发, 多个地区出现前兆异常, 云南省地震局、中国地震局组织了多学科、多手段综合强化跟踪监测, 多数研究者倾向云南地区具有 $M_s > 7.0$ 大地震的背景。针对云南震情、中国地震局第一监测中心李延兴和黄永祥共同提出“利用 GPS 和 Kaiser 两项新技术在云南昆明—玉溪地区进行大震预测试验研究”项目 (简称 GK 项目), 云南省地震局、中国地震局第一监测中心支持 GK 项目联合申请, 1998 年中国地震局、云南省联合批准将其列为省部联合重点“九五”攻关项目 GKC16-7, 并全面启动。为加速项目进程立即投入大震应急跟踪监测; GK 项目组扩大监测区范围, 从昆明—玉溪地区扩大至邻区, 覆盖云南大部分地区; GPS 测量与“中国网络工程网”闭合, 共增加 85% 点 (次), 测量精度从 10^{-8} 提高到 10^{-9} ; Kaiser 应力点加测与对比共增加 213%, 测量精度从 $<10\%$ 提高到 $<$

8%; 测量深度从 400 m 延伸至 1 275 m; 加速创新性本构关系发震应力条件、发震几率、发震时间临界度等的研究, 从物理力学本质上判定 $M_s > 7.0$ 大地震近期是否会在本区发生; 是否会发生强震、中强震; 能否缩小预测预防区范围, 减小一些虚报、虚防, 求得更大范围内的社会安定, 从消极被动的等待中, 变为主动积极的跟踪大地震。

1 GK 联合并网, 跟踪 $M_s > 7.0$ 地震

1.1 GK 并网布设

GK 联合并网, 网区范围 ($23^\circ \sim 26.5^\circ \text{N}$, $101^\circ \sim 103.5^\circ \text{E}$) 内有 20 个 GPS 站点, 16 个 Kaiser 应力测点。区内有 10 条活动断裂带 (图 1), 区内发生 1833 年嵩明 8 级大地震, 1970 年通海 7.7 级大地震等。

1.2 GPS 跟踪监测

研究区 GPS 站点有 20 个, 2 期实测 40 个点 (次), 加密观测 27 个点 (次), 合计 67 个点 (次) (加密 85%), 网区范围扩至 ($23^\circ \sim 28^\circ \text{N}$, $99^\circ \sim 104^\circ \text{E}$), 跟踪加密区域几乎覆盖云南大部分地区。观测精度从 10^{-8} 提高到 10^{-9} , GPS 站绝对定位精度优于 3 mm, GPS 站速度精度优于 2.5

* 收稿日期: 2018-06-05.

基金项目: 云南省地震局地震科技自立项目——科技专项资助 (2017ZX03)。

mm, 全网的精度达到国内外同类 GPS 网的先进水平。

1999—2001 年云南地区 GPS 最大剪应变等值

线如图 2 所示。由图 2 可见, 云南地区最大剪应变速率的高梯度带区域有: 昆明滇东北地区, 昆明以南地区和丽江滇西北地区。

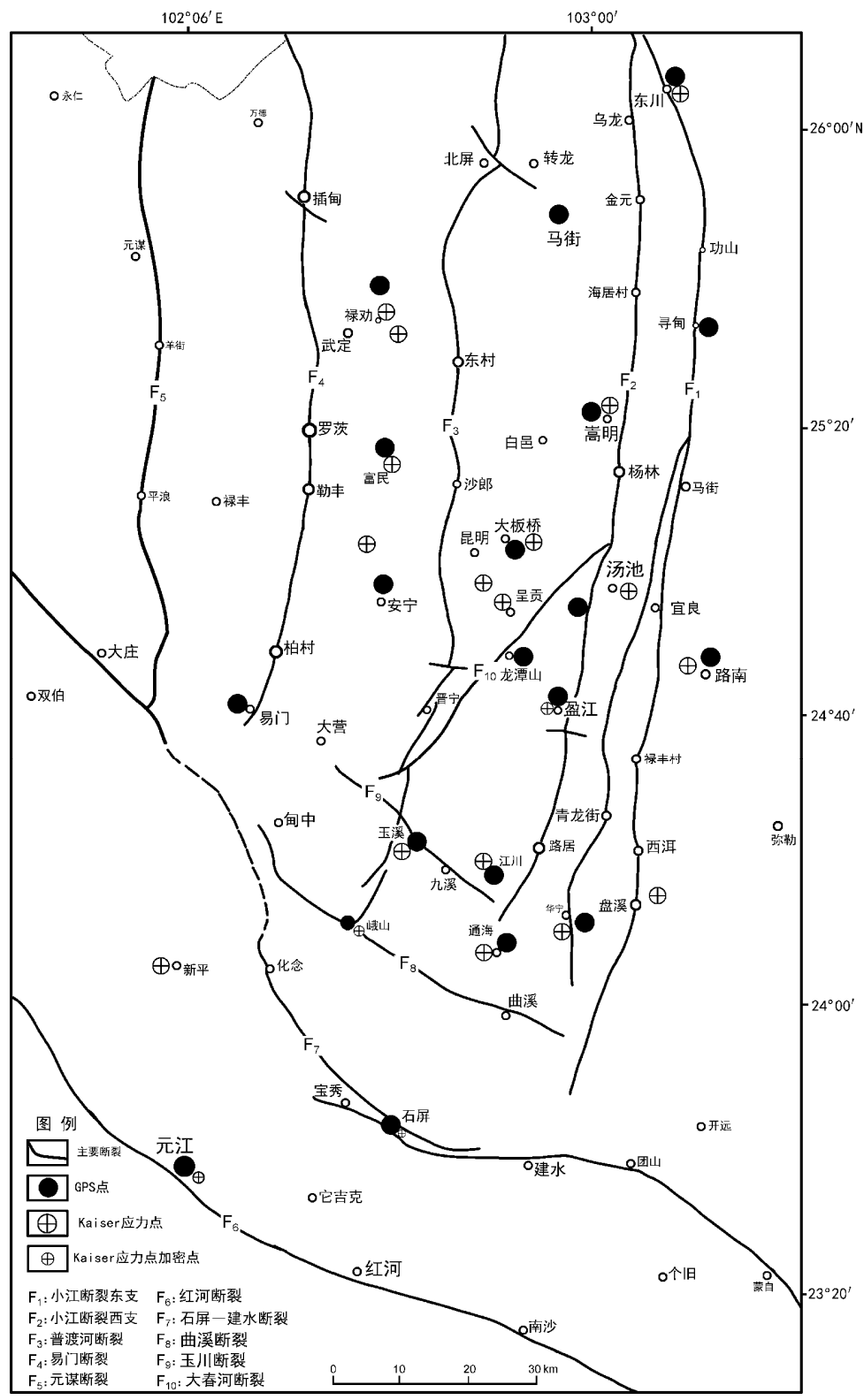


图 1 昆明—玉溪地区及邻区 GPS 和 Kaiser 应力网点布设与地震活动构造图
Fig. 1 GPS and Kaiser stress measurement network and seismotectonic map of the Kunming - Yuxi Region

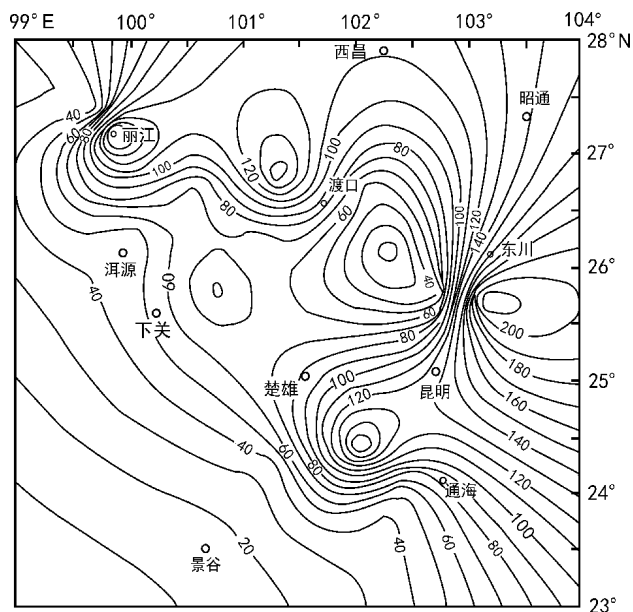


图2 1999—2001年云南地区最大剪应变等值线图 (单位: 10^{-9})

Fig. 2 Contour of maximum shear strain of the Yunnan region during 1999—2001 (Unit: 10^{-9})

1.3 Kaiser 应力跟踪监测

研究区有 8 个 Kaiser 应力点、跟踪大震加密 8 个点和 9 个对比点, 共计 25 个点。跟踪加密达 231%, 人力投入增加 56%, 测试精度从 $<10\%$ 提高到 $<8\%$, 昆明地区新增 3 个对比点, 采样深度从 100 ~ 500 m 加深至 1 275 m, 这对控制应力梯度判定危险性至关重要。另外 6 个对比点在新平铜矿, 同一岩层深度 535 m, 标本定向采样对判定应力方向起控制性作用。Kaiser 应力测点范围为 ($23^{\circ} \sim 26.5^{\circ}\text{N}$, $101^{\circ} \sim 103.5^{\circ}\text{E}$), 实现 Kaiser 应力网与 GPS 网并网监测。

(1) 地应力值的测量

对于 Kaiser 效应法, 笔者在吸取前人及吉川—茂木等经验的基础上, 在 AE 检测中使用美国 MIS-TRAS2001 系统, 采用再次加载法、AE 多参量联合判定, 有效地提高了 Kaiser 效应点的识别能力和测试精度。测试相对误差小于 8%, 标准误差一般为 0.88 ~ 1.30 MPa。

为了证实 Kaiser 效应法测出的是否是现今地应力, 初次采用原岩与回灌混凝土同步进行, 证明二者相近, 与 GPS 同步进行, 也证明有良好的一致性 (黄永祥等, 2002a)。最大主应力和方向的计算在采用金川忠法的同时, 采用高斯—牛顿法,

麦丹劳法拟合求解, 所得结果与金川忠法相近, 但可简化测试和计算。

(2) 地应力值的实测结果及应力特点

测点、点号、测试深度、最大水平主应力 σ_{hmax} 、最小水平主应力 σ_{hmin} 及垂直应力 σ_v , 应力—深度遵从 $\sigma = a + bH$ 公式, 相关系数 r 均大于 0.90。最大测试深度昆明地区为 1 275 m, 富民为 415 m, 玉溪、通海、江川、东川、禄劝为 200 m 左右。40 ~ 60 m 的测点有路南、嵩明、盘溪、华宁、澄江等。本文的重点是探讨昆明—玉溪地区的深部应力状态。

研究区的应力特点之一为水平应力大于垂直应力, 二者比值为 1.5 ~ 3.0, 特点之二为最小水平主应力往往与垂直应力相近, 这与本区构造有关。NW 向和 NE 向断裂为走滑性质, 近 SN 向断裂表现为压扭 (个别地点会出现逆断性质)。

(3) 最大剪应力场如图 3 所示, 由于研究区的构造应力方向为 NWW, 使得剪应力集中部位主要出现在研究区内南侧与构造走向较接近的断裂带附近 (如楚雄—建水北西向断裂带附近, 红河断裂带两侧), 个别点位有差异性。这几个最大剪应力集中的部位, 范围较小, 大部分地区最大剪应力值 $\tau_{\text{max}} < 5.0 \text{ MPa}$ 。

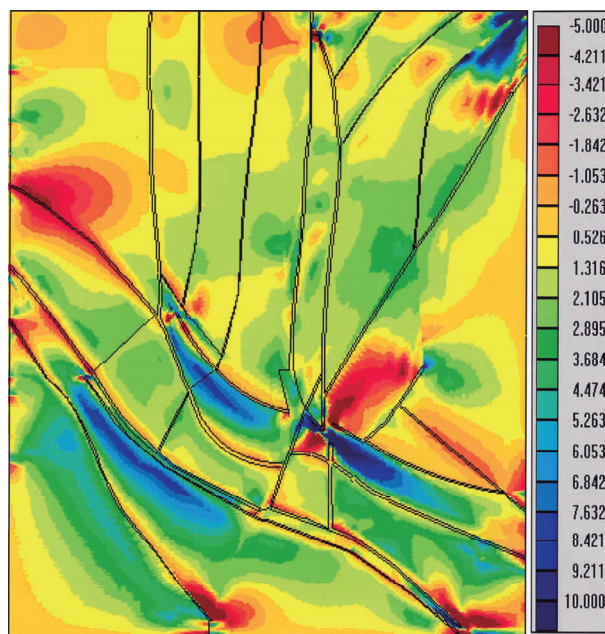


图3 研究区最大剪应力分布图谱 (单位: MPa)

Fig. 3 Contour of maximum shear stress of the study region (Unit: MPa)

1.4 GK 同步观测结果与数模拟合计算值对比

根据昆明—玉溪地区 (22.5° ~ 26.5°N, 101° ~ 104.5°E) 与相邻区地质构造建立了研究区地质计算模型, 按探测资料等分块带选择力学参数, 采用国际通用有限元软件 2D- σ 作为基本运算工具, 对本区加密 GPS 和 Kaiser 应力网实测值进行反复反演递推得到最佳拟合。以 GK 实测值为基础, 可以与数模拟合计算值联合使用 (黄永祥等, 2002b)。

2 GK 联合本构关系检验

2.1 本构关系

描写岩石或岩体的应变 ε (或应变率 $\dot{\varepsilon}$) 依赖于应力 σ 、温度 T 、时间 t 等因素的力学表达方式, 简称为本构关系:

$$\varepsilon(\text{或 } \dot{\varepsilon}) = f(\sigma, T, t \dots) \quad (1)$$

本构关系是岩石力学最重要最基本的关系。若能实测出原地应力场的应力 σ , 同时又测出应变 ε (或应变率 $\dot{\varepsilon}$) 和地应力场环境温度、时间过程, 那么利用本构关系就可以知道场地岩石 (地震区) 的力学性质。本构关系提供了应力-应变之间的本质联系; 通常将本构关系中的应力 σ 、应变 ε 、温度 T 、时间 t 等称为本构本征量。据现在的认识水平, 地震过程从某种意义上说也是本构过程, 但遗憾的是目前还很难同时测出震前的本征量。

2.2 摩擦本构定律

自 Brace 等 (1996) 首次提出粘滑的不稳定区可能是地震破裂的机制以来, 对摩擦滑动系统不稳定的性质和发生不稳定的条件, 已经做了大量的实验工作。在 Dieterich (1979) 提出的速率和与状态有关的摩擦本构定律的基础上, 给出以下解析表达式:

$$\tau = \tau_* + \theta + A \ln(V/V_*) \quad (2)$$

$$d\theta/dt = V/L[\theta + B \ln(V/V_*)] \quad (3)$$

式中: V_* 是一个任意的正的参考速度; τ_* , A , B 和 L 是正的经验常数; τ 是摩擦力; θ 是状态常量; V 是滑动速率。为了以后讨论的方便, 我们引进以下的无量纲的量: 摩擦应力 $f \equiv (\tau - \tau_*)/A$; 对数滑动速度 $\Phi \equiv \ln(V/V_*)$; 状态变量 $\Theta \equiv \theta/A$;

常数 $\lambda \equiv (B - A)/A$; 时间 $T \equiv (V_* t)/L$ 。从式 (2) 和 (3) 可见, 从地震现场获得诸量是很困难的。但其中主控因素是滑动速率 [若不考虑式 (3) 对摩擦 τ 的影响, 而式 (2)、(3) 中其余各量均为常量]。将式 (2) 简化成:

$$\tau \propto \ln V \text{ 或 } \tau_{\max} \propto \ln V \quad (4)$$

2.3 摩擦本构检验结果

根据拟合计算的最大剪切应力 τ_{\max} 值和断裂两侧相对位移速率 V , 作出昆明—玉溪地区及邻区最大剪应力 τ_{\max} 与断层两侧位移速率 $\ln V$ 的关系图。

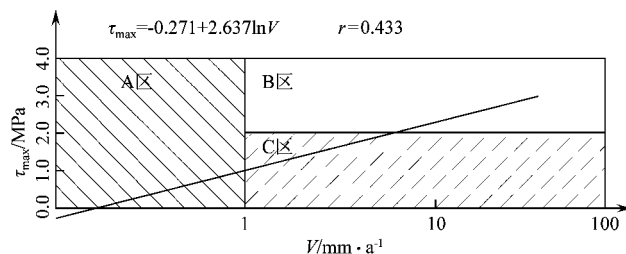


图4 昆明—玉溪地区及邻区最大剪应力 τ_{\max} 与断层两侧位移速率 $\ln V$ 的关系图

Fig. 4 Relationship between maximum shear stress (τ_{\max}) and deformation rate ($\ln V$) of both sides of the fault around the Kunming - Yuxi region

从图4可见, τ_{\max} 和 $\ln V$ 的拟合公式为: $\tau_{\max} = -0.271 + 2.637 \ln V$ (不含9, 10, 11三个点), 置信度 $r = 0.433$ 检验通过。2者遵从本构关系, 遵从于一个统一力学体。另外, 图中3个不同力学属性分区分别为: A区是高剪切应力对应的低位移高危险性闭锁区, B区是高剪应力对应的高位移危险性断裂活动区, C区是低剪应力对应的高位移速率低危险性断裂蠕滑区。

本文采用 τ_{\max} 和 $\ln V$ 的本构简化关系和多个判据联合在多个闭锁区、多个形变集中区寻找最危险、最活动的地区; 排除大形变、低应力蠕滑区, 这种方法比单个参量分析更为有效。这也是检验 GK 能否联合, 同属一个力学总体的关键所在。个别点偏离本构拟合线, 证明应力-应变出现异常, 因此本构拟合线也可作为判定应力-应变出现异常的准则。根据郭增建等 (1996) 调整-积累组合震源模式, 闭锁-蠕滑配套地段也就是高应力梯度带发展为震源的可能性较大。

3 发震应力条件与地震危险性判定

发震应力条件与地震危险性判定, 选用组合危险性判据 $A_1 \sim A_6$, 根据 GPS 地形变场, Kaiser 效应应力场和数模拟合反演的形变场、应力场, 取读所需的各参量, 进行地震危险性判定。

3.1 A_1 ——破坏接近度

若一点的 Mohr 圆和 Coulomb ($\tau_1 = S_0 + \mu\sigma$) 线相切, 则破裂必定发生 (也意味着该点处于地震危险状态)。

$$\text{定义破坏近度 } n = \tau' / \tau \quad (5)$$

式中: τ' 为某部位的数模计算剪应力; τ 为对应该部位的岩土抗剪强度, 即:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + C \quad (6)$$

式中: σ 为部位所受的正应力; φ 为该对应部位岩土体的内摩擦角; C 为该对应部位岩土体的内聚力。

根据破坏接近度 n 的定义, $n < 1$ 表示材料未破坏 (该部位处于安全稳定状态), 反之 $n > 1$, 则表示材料破坏 (局部破坏——该处处于危险), 从 n 接近 1 的程度, 判定地震危险接近度。

从表 1 可见, 本研究区内如果撇开模型靠近边界的地带不管, 重点考虑本项目主要研究区, 大范围内 n 值只有 0.2 ~ 0.5 (表明未出现大范围的危险)。而相对临近 1 的部位有: 楚雄—建水断裂带, 小江断裂西支嵩明—华宁段。接近度只表示点与点的相对比较, 因为岩土抗剪强度只是个估计值。

3.2 A_2 ——本构关系

摩擦阻力 τ 与摩擦滑动速度 V 的关系遵从于 Dieterich 公式:

$$\tau = \tau_s + \theta + A \ln(V/V^*) \quad (7)$$

式中: V^* 为一个任意的正的参考速度; τ_s , A 是正的经验常数; θ 是状态变量。从式 (7) 可见, 其中主控因素是速率对数 $\ln V$ 对摩擦阻力 τ 的影响, 而视其它量为常量, 假定 $\tau \propto \ln V$ 或 $\tau_{\max} \propto \ln V$, 由文献可见其 2 者有相关关系, 现定义断裂活动状态系数为 $Bn = (\tau_{\max} / \ln V) \div \text{平均}(\tau_{\max} / \ln V)$, 式中: $Bn > 1$ 表示断裂处于活动状态 (高剪应力、高速率); $0 < Bn < 1$ 表示处于蠕滑状态 (低剪应力、大速率); $Bn < 0$ 表示处于闭锁状态 (高剪应力、小速率)。

从表 1 可见, 小江断裂西支汤池—澄江—江川处于闭锁, 石屏、峨山处于蠕滑, 其它各点处于活动状态。

3.3 A_3 ——临界走向断裂

据丁文镜 (1982), 黄福明等 (1995) 研究, 并用 Coulomb 与 Mohr 准则、Byerlee 定律分析对比可知, 在给定 (或已知) 的应力场中, 不同走向的断裂其发展成发震断裂的可能性是不相同的, 只有满足临界走向的断裂, 它的发展几率才较大。

对于岩体破坏, 它遵从 Coulomb 准则:

$$\tan \varphi = \mu \quad (8)$$

$$\varphi = 90^\circ - 2\alpha \quad (9)$$

式中: φ 为破裂内摩擦角; μ 为摩擦系数; α 为最大主应力方向与临界破裂面走向夹角, 小于 45° 。对于大多数岩石 $\mu = 0.6 \sim 1.0$, 也就是它所对应的 α 角范围为 $22.5^\circ \sim 30^\circ$ 。

本研究区的历史强震绝大多数沿本区主干断裂发生, 它的发展机理更接近于摩擦滑动, 它遵从于 Byerlee 定律的可能性更大。Byerlee 定律中 $\mu = 0.6 \sim 0.85$, 它对应的临界断裂走向与最大主应力方向夹角 α 为 $25^\circ \sim 30^\circ$ 时, 该断裂处于临界摩擦活动状态。因此 $\alpha = 30^\circ \sim 25^\circ$ 为容易发震的夹角 (下称“易震角”); 当夹角 α 为 $31^\circ \sim 45^\circ$ 或 $0^\circ \sim 24^\circ$ 时也可以发震 (下称“可震角”)。当夹角 α 为其它角度时为不易发震角。

从表 1 可见, 个旧、易门处于“易震角”, 双柏、石屏、建水、新平、峨山、通海和元江处于“可震角”, 其它点位于不易震角。也就是说个旧、易门发展成发震的可能性较大, 双柏、石屏、建水、新平、通海次之, 其它部位较小。

3.4 A_4 ——最大剪应力 τ_{\max} 与平均应力 σ_m

平均应力 $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$, 类似于围压的作用。平均应力值愈大, 产生剪切破裂所需的差应力就愈大, 因此愈不容易发生破裂。2 者的作用相反, 剪切破裂能否发生, 受这 2 种因素的制约, 昆明—玉溪地区最大:

$$\bar{\tau}_{\max} = A + B\sigma_m \quad (10)$$

式中: $\bar{\tau}_{\max}$ 为回归得到的最大剪应力; σ_m 为相应地点的平均应力。 $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 中: σ_1 为最大主

应力； σ_3 为最小主应力；当 $\tau_{max} > 0$ 时，表示危险。

从表 1 可见，双柏、建水、新平、通海、玉溪、汤池、澄江、江川、华宁、富民、安宁等地具有发生剪切破裂的围压条件，相对危险（即 $\tau_{max} - \bar{\tau}_{max} > 0$ ），反之其它点相对安全。

3.5 A_5 ——剪应力集中系数 τ_n

最大剪应力愈大，表示其集中程度愈高，愈容易发生剪切破裂。本研究区的最大剪应力分布情况详见最大剪应力分布图（图 2）。

剪应力集中度系数为：

$$\tau_n = \tau_{max} / \tau_0 \tag{11}$$

式中： τ_{max} 为某部位的最大剪应力； τ_0 为本研究区的区域平均最大剪应力。剪应力集中度系数 $\tau_n > 1$ 表示应力集中； $\tau_n < 1$ 表示应力不集中。一般集中

与松弛之间的应力梯度带也可能发震，作为危险性判据；也有学者认为在应力松弛点也可能发震。但从材料力学和岩石力学的角度看，应力集中部位发生破坏的可能性较大，因此本研究也选应力集中为危险性判据。从表 1 可见最大剪应力相对集中的部位有双柏、建水、新平、汤池、江川等。

3.6 A_6 ——断层两侧相对位移速度集中度系数 V_n

定义断裂两侧相对位移速率集中度为：

$$V_n = V / V_0 \tag{12}$$

式中： V 为某部位断裂两侧相对位移速率； V_0 为本研究区域平均断裂两侧相对位移速率； $V_n > 1$ 表示速率加速集中（危险）， $V_n < 1$ 表示位移速率不加速集中（不危险），从表 1 可见，位移速率加速的部位有石屏、双柏、建水、新平、寻甸、华宁等。

表 1 断裂活动性 $A_1 \sim A_6$ 判据与危险性判定结果汇总表
Tab. 1 Criteria of fault activity ($A_1 \sim A_6$) and decision results of seismic risk

断裂带	测点序号	测点名称	A_1		A_2		A_3		A_4		A_5		A_6		ΣN	P
			B_1		B_2		B_3		B_4		B_5		B_6			
楚雄— 建水 断裂带	1	双柏	0.8 ~ 1.0	✓	2.54	✓	20°	✗	0.3	✓	2.17	✓	1.67	✓	5.5	0.92
	3	石屏	0.2 ~ 0.5	×	0.47	×	20°	✗	~ 0.7	×	0.43	×	1.90	✓	1.5	0.25
	4	建水	0.8 ~ 1.0	✓	2.36	✓	20°	✗	1.1	✓	1.79	✓	1.21	✓	5.5	0.92
	4	个旧	0.8 ~ 1.0	✓	0.41	×	30°	✓	~ 1.3	×	0.27	×	0.93	×	2.0	0.33
小江 断裂带 东支	5	东川	0.2 ~ 0.5	×	1.19	✓	80°	×	~ 0.3	×	0.82	×	0.99	×	1.0	0.17
	6	寻甸	0.2 ~ 0.5	×	1.34	✓	115°	×	~ 0.3	×	1.03	✓	1.24	✓	3.0	0.50
	7	路南	0.2 ~ 0.5	×	1.54	✓	110°	×	0.4	✓	1.20	✓	1.26	✓	4.0	0.67
小江 断裂带 西支	8	嵩明	0.2 ~ 0.5	×	2.16	✓	95°	×	0	✗	0.87	×	1.07	✓	2.5	0.42
	9	汤池	0.7 ~ 1.0	✓	~ 0.69	⊕	90°	×	0.2	✓	1.30	✓	0.06	⊕	5.0	0.83
	10	澄江	0.7 ~ 1.0	✓	~ 0.97	⊕	113°	×	0.4	✗	0.98	✓	0.02	⊕	4.5	0.75
	11	江川	0.7 ~ 1.0	✓	~ 0.54	⊕	90°	×	0.7	✓	1.03	✓	0.003	⊕	5.0	0.83
	12	华宁	0.9 ~ 1.0	✓	1.32	✓	90°	×	0.1	✓	1.14	✓	1.58	✓	5.0	0.83
普渡河 断裂带	13	禄劝	0.2 ~ 0.5	×	1.4	✓	95°	×	0	✗	0.98	✓	1.03	✓	3.5	0.50
	14	富民	0.2 ~ 0.5	×	1.85	✓	115°	×	0.2	✓	1.30	✓	1.04	✓	4.0	0.67
	15	昆明	0.2 ~ 0.5	×	1.21	✓	95°	×	~ 0.3	×	0.92	×	1.07	✓	2.0	0.33
	16	安宁	0.2 ~ 0.5	×	1.56	✓	95°	×	0.2	✓	1.14	✓	1.12	✓	4.0	0.67
曲江、玉溪 断裂带	17	易门	0.8 ~ 1.0	✓	1.21	✓	25°	✓	~ 1.4	×	0.54	×	0.54	×	3.0	0.50
	18	新平	0.8 ~ 1.0	✓	1.71	✓	10°	✗	0.9	✓	1.36	✓	1.33	✓	5.5	0.92
	19	峨山	0.2	×	0.46	×	12°	✗	—		0.27	×	0.78	×	0.5	0.08
	20	通海	0.2 ~ 0.5	×	1.79	✓	23°	✗	0.52	✓	0.92	×	0.56	×	2.5	0.42
	21	玉溪	0.2 ~ 0.5	×	1.57	✓	55°	×	0.6	✓	0.92	×	0.77	×	2.0	0.33
红河断裂 南带	22	元江	0.8 ~ 1.0	✓	1.35	✓	20°	✗	~ 2.1	×	0.92	×	0.99	×	2.5	0.42

注：✓表示危险；×表示安全；⊕表示闭锁；✗表示半危险。

3.7 A₁ ~ A₆ 判定结果汇总

根据 GPS 地形变, Kaiser 效应地应力实测值结合数模反演应力场形变场取读相应的应力应变场参量, 按危险断裂活动组合判据 A₁ ~ A₆ 的计算公式 (5) ~ (12) 进行运算, 并将危险性判定结果汇总为表 4。

从表 1 可看出各点的危险性判定结果, 竖列表示同一判据不同点的判定结果; 横行表示同一点位, 不同判据的判定结果。

表 2 从判据 A₁ ~ A₆ 判定危险、安全、闭锁、半危险统计表 (抽样点总数 132)

Tab. 2 Criteria of fault activity (A₁ ~ A₆) showing danger, safe, locking and half danger (total samplings are 132)

判据 A ₁ ~ A ₆ , B ₁ ~ B ₆	危险性判定出现次数			
	危险	安全	闭锁	半危险
破坏临近度 A ₁ B ₁	10	12	—	—
本构关系 A ₂ B ₂	17	3	3	—
临界走向 A ₃ B ₃	2	12	—	8
最大剪应力与平均应力 A ₄ B ₄	14	7	—	—
剪应力集中度 A ₅ B ₅	12	10	—	—
位移集中度 A ₆ B ₆	11	7	3	—
出现累计数	66	51	6	8
出现比例	50%	39%	5%	6%

从统计表 2 可见, 危险 (包括闭锁)、安全 (包括半危险) 大约各占 1/2。危险这一半还有待于细判细分, 最终 2/3 以上的点都不具备发震应力条件, 自然也就被排出预测预防区。

3.8 发震几率

为减少判断的不确定性, 笔者采用 GPS 形变与 Kaiser 应力联合判定判据 A₂, 目的是寻找并区分多震区中的活动段 (高形变对应高应力段)、闭锁段 (小形变对应高应力段)、蠕滑段 (高形变对应低应力段)。为了与断层水平位移滑动速率对应引入判据 A₆。以上 6 个判据分别反应危险性的一个侧面, 采用 6 个判据联合, 6 个判据之间可能互补 (减少片面性), 统计 6 个判据对应判定点判据出现的几率大小和分布, 综合判定危险性的程度和区段, 判据出现的几率, 简称为发震几率。

单一判据反映的只是危险性的一个侧面, 具有片面性。本文利用所列的判据 A₁ ~ A₆, 对研究区 22 个抽样点进行综合判定。由表 1 可知: 较高

的潜震部位有双柏、建水、新平 (几率为 0.92), 其次汤池、江川、华宁 (几率为 0.83)。根据判据 A₂ 判定, 汤池、澄江、江川处于闭锁段, 个旧、峨山处于蠕滑段。

3.9 发震时间临近度

选用 Byerlee 定律 (梅世蓉, 1985) 将 Byerlee 摩擦强度 (Byerlee, 1978) 作为临近地震危险性的应力场限定条件, 作 Byerlee 线 (图 5) ($\tau = 0.85\sigma$, $\tau = 0.5 + 0.60\sigma$)。由图 5 可见, 江川测点和昆明—玉溪集合, 同法求作各测点的 Mohr 圆 (略), 其 Mohr 圆切线 (K 线) 均位于临界 Byerlee 线 (B 线) 之下, 也就是应力状态尚未临近摩擦强度。

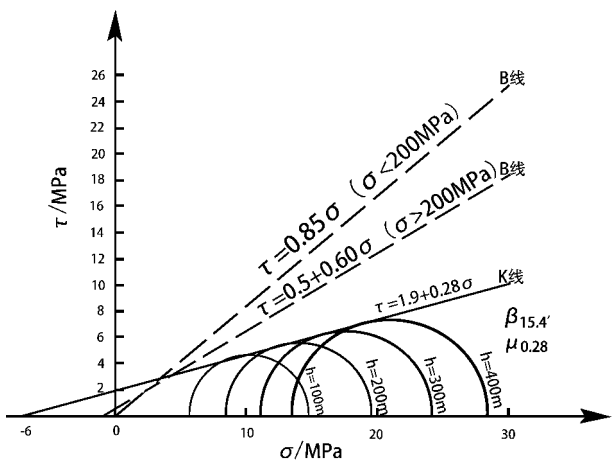


图 5 昆明—玉溪地区及邻区剪应力 τ 与正应力 σ 关系图

Fig. 5 Relationship between area map of shear Stress (τ) and normal stress (σ) around the Kunming - Yuxi region

为表明各测点的差异性, 假定各拟合 $\tau = S_0 + \mu\sigma$, 式中 S_0 近似相等, 与 Byerlee 公式写为 $\tau^* = S_0 + \mu\sigma$ 中 S_0 也相近, 那么定义危险性临近度 $n \approx \tau/\tau^* \approx \mu/\mu^*$, 按测点求 μ/μ^* (取 μ^* 为 0.60, 危险性临界 B 线), 列成表 3。

表 3 昆明—玉溪地区地震危险性临近度表

Tab. 3 Closing degree of seismic risk of the Kunming - Yuxi region

参数	昆明—玉溪	昆明	东川	玉溪	通海	江川	富民
μ	0.28	0.19	0.19	0.39	0.38	0.46	0.28
n	0.47	0.37	0.32	0.63	0.63	0.77	0.47

从表3可见,临近度相对较高的地点是江川($n=0.77$),其次是通海、玉溪($n=0.63$),再次是昆明—玉溪地区($n=0.47$),富民($n=0.47$),昆明($n=0.37$),东川($n=0.32$)。

3.10 发震震级

昆明及邻区的北部和东北部为张应变区,最大张应变速率为 $5 \times 10^{-8}/a$;中南部为压应变区,最大压应变速率为 $1.1 \times 10^{-7}/a$ 。形成了4个主压应变高值区:昆明东北地区、昆明以南地区、下关地区和渡口地区,其中昆明东北地区和昆明以南地区的最大主压应变速率为 1.1×10^{-7} 主压应变速率/ a 。在昆明东北地区和渡口地区形成了2个主压应变的高梯度带,出现了4个最大的剪应变高值区:昆明东北地区、昆明以南地区、渡口西北和丽江西北地区,其中滇东北地区最大为 $2.1 \times 10^{-8}/a$ 。根据应变场的强度估计,已经具备发生6.0~7.0级中强地震的条件,发生7.0级以上大地震的条件尚未完全具备(李延兴,郭良迁,2002)。

根据昆明、玉溪、江川等点位 Kaiser 效应法地应力测量结果,参照1996年丽江7.0级地震的方法,分析判定与Byerlee临界摩擦强度线, Sibson (Sibson, 1974; 李四光, 1977) 线性摩擦强度公式的临近程度,得出:(1)昆明—玉溪地区3~5 a内发生 $M_s > 7.0$ 地震的可能性较小;(2)以江川为中心(澄江、汤池)地区,其应力值相对较高,估计3~5 a内有发生中强震及中小地震增多的可能性(黄永祥等, 2002c, d)。

4 危险性综合判定结论

4.1 $M_s \geq 7.0$ 大地震的判定结论

昆明—玉溪地区及邻区总体应力水平处于中等应力状态。400 m左右平均应力为35.5 MPa (1996丽江震前400 m左右应力为45.8 MPa),发震时间临近度本区处于0.32~0.77(江川小范围内为0.77);本构检验表明:断裂处于高活动段(双柏范围较小),江川—澄江处闭锁区段(范围也较小),大范围内不具备 $M_s \geq 7.0$ 地震的发震条件。1~3年云南地区不会发生 $M_s \geq 7.0$ 地震,实际至2015年云南地区未发生 $M_s \geq 7.0$ 地震。

4.2 $6.0 \leq M_s < 7.0$ 强震的判定结论

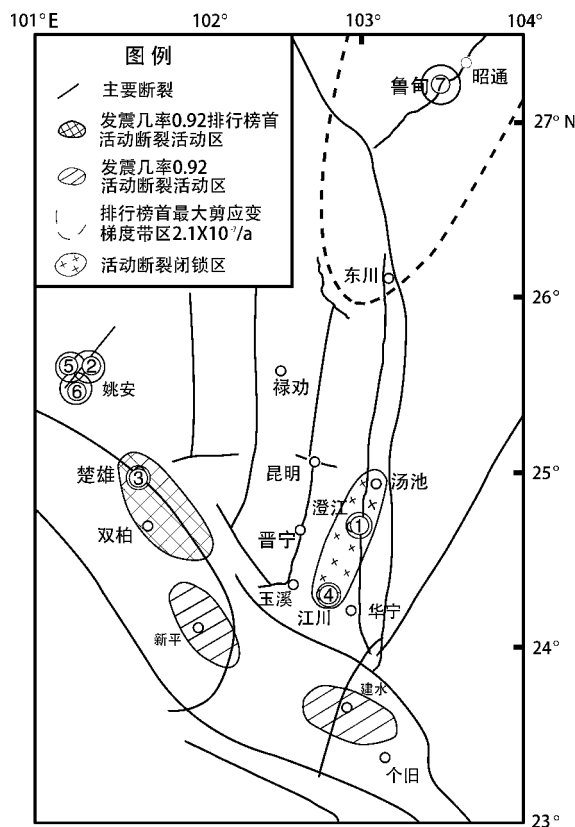
滇东北地区剪切应变值达 $2.1 \times 10^{-8}/a$,已具备发生6.0~7.0级强震的条件,发生 $M_s \geq 7.0$ 地

震的条件尚未完全具备,发震几率,发震临近度偏小,估计10年左右可能发生强震(6.0~7.0级地震)。

4.3 $5.0 \leq M_s < 6.0$ 中强震的判定结论

具有发震应力条件,发震几率为0.83~0.92,发震临近度为0.77的闭锁区江川—澄江,断裂高活动区,发震几率为0.92的地区楚雄—双柏—建水断裂,双柏等地3~5年内有可能发生 $5.0 < M_s < 6.0$ 地震。

由表4和图6可见(图6与表4中序号相对应),姚安、楚雄地震临近双柏,澄江、江川地震就发生在预测闭锁区。2014年鲁甸6.5级地震发生在高剪切应变值为 $2.1 \times 10^{-8}/a$ 的梯度带区。1999—2015年云南地区未发生 $M_s \geq 7.0$ 大地震,表明预测判定与实发地震相近相邻基本一致。



预测应用实发地震: ① 5.2 级澄江地震 (1999-11-25); ② 5.9 级姚安地震 (2000-01-05); ③ 5.3 级楚雄地震 (2001-07-10); ④ 5.1 级江川地震 (2001-07-15); ⑤ 6.2 级姚安地震 (2003-07-21); ⑥ 6.1 级姚安地震 (2003-10-16); ⑦ 6.5 级鲁甸地震 (2014-08-03)

图6 昆明—玉溪地区及邻区地震危险性预测结论与实发地震对应图

Fig. 6 Correlation of prediction and the actual occurred earthquake around Kunming - Yuxi region

表 4 预测预防结论意见与实发地震对应表

Tab. 4 Coorelation between prediction results and the actual occurred events

序号	发震日期	发震地点	震级	发震应力条件（力学属性）	发震几率	1~3 年内可能性
①	1999-11-25	澄江	5.2	活动断裂闭锁区	0.75	5~6 级中强震
②	2000-01-05	姚安	5.9	靠近排行榜首双柏活动断裂带	0.92	5~6 级中强震
③	2001-07-10	楚雄	5.3	靠近排行榜首双柏活动断裂带	0.92	5~6 级中强震
④	2001-07-15	江川	5.1	活动断裂闭锁区	0.83	5~6 级中强震
⑤	2003-07-21	姚安	6.2	靠近排行榜首双柏活动断裂带	0.92	5~6 级中强震
⑥	2003-10-16	姚安	6.1	靠近排行榜首双柏活动断裂带	0.92	5~6 级中强震
⑦	2014-08-03	鲁甸	6.5	排行榜首滇东北最大剪切应变值 $2.1 \times 10^{-8}/a$ 梯度带	—	10 年左右 6.0~7.0 级强震

5 讨论

5.1 地震预报三要素

地震预报难中之难是发震地点的预报，其原因如下：

（1）中—短期发震地点的预报缺乏有效的预报方法。现有的发震地点的中短期预报的依据很大程度上是地震活动性图像（空区），但根据“七五”“八五”攻关项目研究结果，同一种地震活动图像出现的时间差异可达几年至十几年，因此，“空区”对 1~2 年甚至几个月的中短期预报是无能为力的（罗灼礼等，1983）。

（2）地震前兆具有复杂性，多样性和不确定性。大陆地震具有成丛发生的特点，在一个地震活跃期内，一个地区往往出现多个应力集中区和释放区，在不止一处出现前兆趋势性异常或地震空区（但不是每个这样的地区都会发震），加之临震异常空间上存在大尺度的不均匀分布，因此，大大增加了发震地点判断上的困难，所以地震三要素的预报难中之难是带有时间尺度的地点预报。

以上原因往往使预报的范围不得不扩至很大，导致预防带有较多的不确定性（梅世蓉等，1985）。

5.2 遵循李四光先生，傅承义先生的教导

李四光（1977）教导：地震是地质构造、地质岩体在构造应力的作用下突然断错的结果，发生在剪应力最大、应力积累速度最快的地区（构造差异运动最强烈的地区）。李四光主张地震预报的重点在于研究地应力的积累和释放过程，应直接测量地应力。

傅承义（1971）红肿理论教导：震前在较大范围内，比震源体大得多的地区的应力处于加速积累的状态（发生红肿），红肿区内可能出现多个、多处应力集中点，其中某个应力集中点应力积累加速的更快、更强烈地发展成为发震点（流脓点）。

5.3 创意 GK 联合，打破 GK 分离定势

1996 年云南丽江 7.0 级地震前，笔者曾经分别利用 GPS 地形变监测，Kaiser 效应法地应力测量对丽江地震做过较好的预测，GK 项目和 GK 联合跟踪大震的中心思想是 GK 联合并网监测，利用本构关系等将 GK 连为一个统一力学体，从力学本质上解读地震难题。构想能否提高发震应力条件、发震几率、发震时间的判定准确率，从一大片红肿区中找出符合发震应力条件、发震几率较大的“潜震点”，排除不具备发震应力条件、发震几率较小的诸多非潜震点，最大限度地缩小预测预区，集中优势跟踪大震。

在中国地震局，云南省科技厅，云南省地震局的正确领导下，项目组成员，协作单位等共同努力，克服了很多难题，GK 项目跟踪监测的顺利完成；感谢马宗晋、陈鑫连、梅世蓉、郭增建先生，车时司长指导！感谢支持本项目研究的各级领导，老朋友，老同事！

参考文献：

丁文镜. 1982. 一个划定强震危险区的方法[J]. 地震学报, 4(2): 127-134.
傅承义. 1971. 关于地震发生的几点认识[J]. 地震战线, (8): 35-36.

- 郭增建. 1996. 地气耦合与天灾预测[M]. 北京:地震出版社, 373-374.
- 皇甫岗, 石绍先, 苏有锦. 2000. 20 世纪云南地震活动研究[J]. 地震研究, 23(1): 1-9.
- 黄福明, 马延著, 李群芳. 1995. 华北北部构造应力场[J]. 中国地震, 11(2): 121-131.
- 黄永祥, 黄润秋, 许强, 等. 2002a. 昆明—玉溪研究区 GPS 和 Kaiser 应力测量结果与数模拟合反演[J]. 地震研究, 25(增刊 A): 48-56.
- 黄永祥, 黄兴益, 王伟琼, 等. 2002b. AE 法地应力测量扩展研究——现今地应力的对比测试与可靠性研究[J]. 地震研究, 25(增刊 A): 92-98.
- 黄永祥, 李延兴. 2002c. 昆明—玉溪研究区及邻区本征量的测定与本构检验[J]. 地震研究, 25(增刊 A): 17-23.
- 黄永祥, 李正光, 黄浩雄. 2002d. 昆明—玉溪研究区 AE 法深部地应力测量结果与地震危险性分析[J]. 地震研究, 25(增刊 A): 39-49.
- 李四光. 1977. 论地震[M]. 北京:地质出版社, 95-96.
- 李延兴, 郭良迁. 2002. 昆明及邻区的地震活动趋势估计[J]. 地震研究, 25(增刊 A): 12-16.
- 罗灼礼, 朱凤鸣, 马宗晋, 等. 1983. 对中国地震预报现状及其发展的一些认识[J]. 山西地震, (4): 26-27, 18.
- 梅世蓉. 1985. 地震前兆的地区性[J]. 中国地震, 1(2): 19-25.
- Brace W F, Paulding B W, Scholz C, et al. 1996. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks[J]. Journal of Geophysical Research, 71(16): 3939-3953.
- Byerlee J. 1978. Friction of rock[M]//Rock friction and earthquake prediction. birkhauser basel.
- Dieterich J H. 1979. Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations[J]. Journal of Geophysical Research, 84(B5): 2161-2168.
- Sibson R H. 1974. Frictional constraints on thrust, wrench and normal faults[J]. Nature, 249(5457): 542-544.

Application of Earthquake Monitoring Using Measurements of Ground Deformation by GPS and Crustal Stress by Kaiser Effect in the Region of Kunming – Yuxi, Yunnan

HUANG Yongxiang¹, LI Yanxing², HUANG Haoxiong³, WANG Lingli¹

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, TianJin 300180, China)

(3. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Delaware, Newark, DE 19716)

Abstract

From 2000 to 2001, there was trends of potential large earthquakes in the Sichuan – Yuan region. This paper investigated the application of a new technology combining the ground deformation measurement from GPS (G) and the crustal stress measurement from Kaiser effect (K). This technology simultaneously monitored the fields of ground deformation and crustal stress using combined G – K network. Based on the constitutive law and rock mechanics criterion, the stress condition, probability, and magnitude of potential earthquake occurrence were analyzed. It concluded that the Yunnan region lacked the stress condition for large earthquakes of $M_s \geq 7.0$. Northeast Yunnan was identified to have large ground deformation and earthquakes of $M_s 6.0 \sim 7.0$ that might occur in 10 years. Overall the conclusions were consistent with the actual occurrence of earthquakes in Yunnan.

Keywords: ground deformation measurement by GPS; crustal stress measurement by Kaiser effect (K); combined network; simultaneous monitoring; field of ground deformation; field of crustal stress; constitutive law; rock mechanics criterion; stress condition for earthquake occurrence; large earthquake tracing