

文章编号: 0253-3782(2004)S0-0071-08

青藏块体东北缘重力场演化与地震活动^{*}

祝意青^{1, 2)} 李 辉²⁾ 朱桂芝¹⁾ 徐云马¹⁾

1) 中国西安 710054 中国地震局第二监测中心

2) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所

摘要 通过对青藏块体东北缘重力观测资料进行整体平差计算, 系统分析了 1992~2001 年重力场的时空动态演化特征及其与地震活动的关系. 结果表明: 利用统一起算基准获得的青藏块体东北缘重力观测资料, 较完整地反映了青藏块体东北缘孕震过程中出现的流动重力前兆信息. 在地震孕育发生阶段, 重力场出现较大范围的区域性重力异常, 并产生与地震孕育发生有关的局部重力异常区. 重力场动态图象较清晰地反映了区域重力场的有序性演化与地震活动.

关键词 青藏块体东北缘 重力场演化 构造活动 孕震特征

中图分类号: P315.72⁺6

文献标识码: A

引言

地震与重力的关系是以地壳变形和密度(质量)变化而紧紧地联系在一起的. 在地震孕育过程中, 随着震源区应力的不断积累, 导致地面点的空间位置变化. 此外, 应变将伴生地壳介质密度的变化. 所有这些都将导致地面重力场的变化. 我国自 1966 年邢台地震后, 地震工作者在一些重要的地震活动区开展了大规模的流动重力测量和重力变化研究, 观测到了 1976 年唐山 7.8 级地震(Li, Fu, 1983)、1996 年云南丽江 7.0 级地震(申重阳等, 2003)和 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震前后的重力变化(祝意青等, 2003), 积累了可观的资料和一大批研究成果.

青藏块体东北缘是中国大陆地壳运动最强烈、地震活动频度最高、强度最大的地区之一. 该地区的重力监测工作是由中国地震局第二监测中心、甘肃省地震局和宁夏回族自治区地震局等 3 个单位完成的. 以往的研究工作都是各单位针对自己的监测区而进行的. 这种按各个省区监测网进行的分散研究, 由于观测信息的空间密度严重不足, 所得到的信息是残缺不全的, 不能捕捉到孕震过程中出现的完整前兆信息, 这直接制约着我们进行地震分析预报的能力. 如例, 1995 年永登 5.8 级地震发生在中国地震局第二监测中心与甘肃省地震局监测区的交界, 2000 年景泰 5.9 级地震发生在中国地震局第二监测中心与甘肃和宁夏地震局重力监测区的边界.

^{*} 中国地震局“十五”重点科研项目“强震中期预测”(100501-05-05)资助.
2003-07-14 收到初稿, 2003-11-24 收到修改稿, 2004-02-02 决定采用.

重力测量作为地震预测研究的学科，其研究能力在很大程度上取决于观测资料的丰富程度。目前测震学能够成为地震预测的核心学科，除了测震学资料是对地震活动及其演变现象的直接记录外，其观测资料最为丰富和完整也是一个十分重要的原因(江在森等，2001)。我们对区域重力场演化及其与地震活动关系的研究能力，在很大程度上取决于实际监测能力。因此，本文对青藏块体东北缘的重力资料首次进行整体计算分析，统一起算基准，扩大重力研究区，系统分析研究了青藏块体东北缘区域重力场及其时空演化特征，探讨了地面重力变化与地壳运动及构造活动和强震孕育的关系。这有助于该地区强震中期预测研究。

1 测区概况及资料处理

为了有效地监测青藏块体东北缘重力场非潮汐变化与区域构造活动及地震活动的关系，中国地震局第二监测中心对祁连山河西走廊地区 128 个测点(包括甘肃岸门村测点)、甘肃省地震局对兰天武地区 120 个测点(包括宁夏静宁测点)、宁夏回族自治区地震局对宁夏地区 66 个测点，用 LCR-G 型重力仪进行了每年一期的流动重力观测，点位分布及各单位完成测点情况如图 1 所示。监测网跨越了青藏块体东北缘的主要断裂带。晚第四纪强烈活动的北西西向断裂主要有龙首山南缘断裂、祁连山北缘断裂、昌马—祁连断裂、海原断裂等，具有挤压逆冲-左旋性质。北北西向断裂主要有榆木山东缘断裂、庄浪河断裂等，具有挤压-右旋性质。分布于东部的近南北向青铜峡—固原断裂及北北东向的贺兰山东麓断裂以右旋-拉张为主(虢顺民等，2000)。

此次收集了青藏块体东北缘 1992~2001 年的重力观测资料。观测资料的处理采用中国地震局实用化攻关推广的应用软件(LGADJ)进行，采用统一起算基准的整体拟稳平差计算方法：
① 选取 3 个测区中点位比较稳定，且又远离震中的测点，作为统一起算拟稳基准。拟稳点之间重力变化差异较小，反映的重力场合理，这有利于监测区域可靠重力变化信息的提取；
② 先对多期观测资料分别进行独立平差计算，并解算出 LCR-G 型重力仪一次项周期误差等参数的区域适定解(祝意青等，1999)，初步了解各台仪器的观测精度后，合理确定各台仪器的先验方差，再

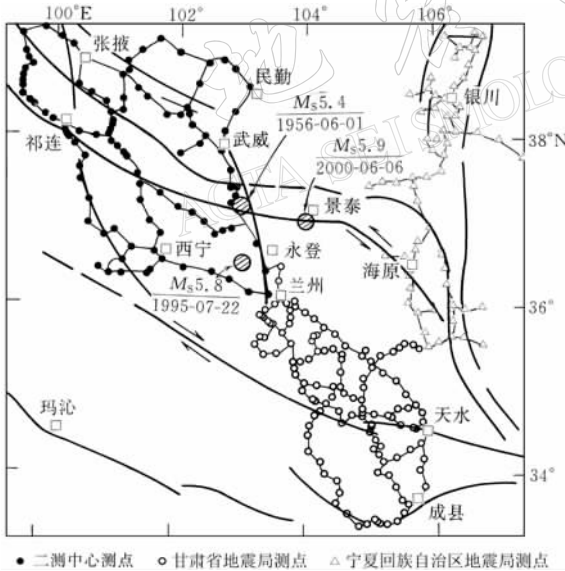


图 1 青藏块体东北缘重力测量路线图

进行整体平差计算，以得到最佳合理解算结果；
③ 对平差结果中极个别周围环境改变或不重合的测点进行了删除；
④ 用最小二乘配置对重力观测数据进行拟合推估和滤波，进一步消除粗差和浅表因素的影响，突出显示构造因素的重力效应(祝意青等，2001a)。各期的观测资料及整体平差计算后重力点值的平均精度情况见表 1。

表 1 青藏块体东北缘重力测量情况(LCR-G 型重力仪)

中国地震局第二监测中心		甘肃省地震局		宁夏回族自治区地震局		点值平均
使用仪器	观测时间	使用仪器	观测时间	使用仪器	观测时间	精度
G999, G1003	1992-07~08	G808, G818	1992-06	G808, G818	1992-08	12.7
G793, G854	1994-07~08	G808, G818	1994-05	G808, G818	1994-07	13.6
G793, G854	1995-07~08	G808, G818	1995-05	G808, G818	1995-07	13.8
G793, G854	1996-07~08	G808, G818	1996-07	G808, G818	1996-06	13.3
G999, G1027	1997-07~08	G808, G818	1997-07	G808, G818	1997-08	10.9
G829, G843	1998-07~08	G808, G818	1998-05	G808, G818	1998-07	12.3
G793, G854	1999-07~08	G808, G027	1999-07	G808, G027	1999-08	12.6
G793, G854	2000-07~08	G808, G818	2000-07	G829, G843	2000-08	11.6
G793, G854	2001-07~08	G808, G818	2001-05	G808, G818	2001-08	11.2

2 青藏块体东北缘重力场演化特征

用 Mapsis 绘制了各时段的重力变化等值线图(图 2). 在深入研究区域重力场的时空动态演化过程后, 认为重力场变化有如下特征:

1) 重力场变化的时段划分. 从图 2 可以看出, 重力变化在有些年份显著, 有些年份不显著. 我们把年变值在 $-30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2 \sim +30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 且正负变化异常区的范围都比较小的时段, 称为无显著变化时段. 例如 1999~2000 年, 2000~2001 年两个时段. 1992~1994 年复测周期为 2 年, 如果按年平均值计算, 其变化值在 $-10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2 \sim +25 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 之间, 幅值不大, 但它在武威—永登—兰州一带形成大面积的正值区, 不应视为无显著变化阶段. 1995~1996 年和 1997~1998 年, 重力变化值分别在 $-20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2 \sim +40 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 和 $-40 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2 \sim +30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 之间, 但正负变化异常区的范围都比较小, 应视为无显著变化时段. 其它时段都有显著变化. 我们主要分析有显著变化的时段, 其中 1994~1995 年、1996~1997 年、1998~1999 年 3 个时段, 重力正值变化与负值变化最大差异值达 $100 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 可认为是有剧烈变化的时段.

重力变化剧烈时段在重力正值变化区的高梯度带附近, 往往对应下一个时段有 5~6 级地震发生. 例如 1992~1994 年重力场在自西向东有序性增强的变化中, 于武威—永登—兰州一带形成一幅度和范围较大的重力正值异常变化区, 并在庄浪河断裂带附近形成重力变化高梯度带, 1995 年 7 月发生的永登 5.8 级地震位于重力变化高梯度带上; 1994~1995 年区域重力场变化空间分布, 总体仍表现自西南向东北逐渐增强的持续性变化, 但空间局部变化更加激烈, 武威—永登的西南形成一走向为北北西向的扁椭圆隆起区, 其两侧形成重力变化高梯度带. 1996 年 6 月在武威—永登异常区西侧正负异常过渡的高梯度带上发生了天祝 5.4 级地震.

1998~1999 年重力变化自西向东急剧增强, 表现出大范围的区域性重力异常. 2000 年 6 月在测区中部, 重力变化由负异常向正异常过渡的区域发生景泰 $M_s 5.9$ 地震.

2) 显著变化时段的重力场分布特征. 重力场在不同时段在空间分布上表现出明显的差异性. 无显著变化时段, 空间分布比较分散, 没有明显的规律性. 在显著变化时段, 重力场空间分布则出现有规律的变化和相对集中性. 例如, 1992~1994 年, 重力变化自西南向东北逐渐增强, 表现为祁连山区重力负值变化, 武威、银川盆地重力正值变化, 并于武

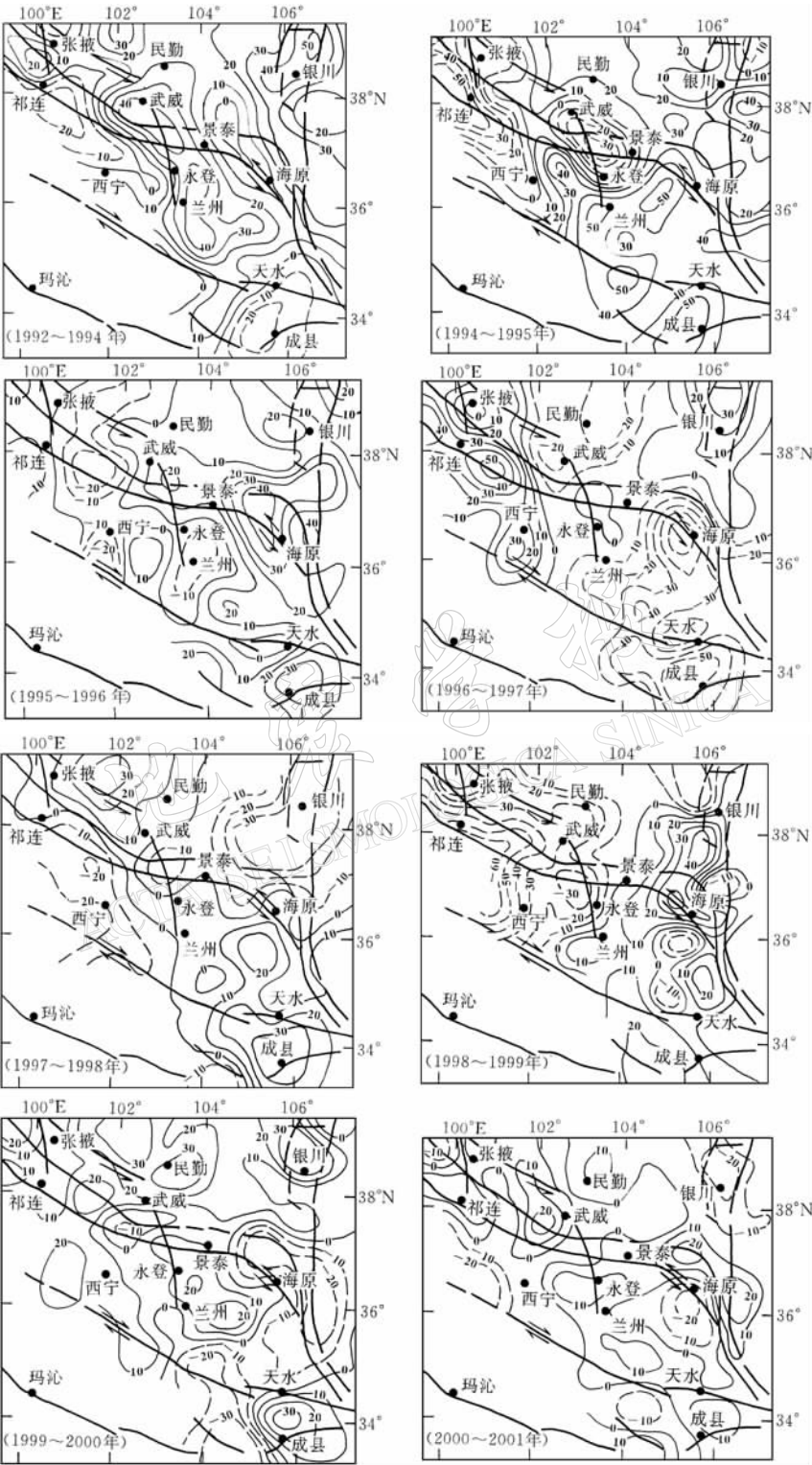


图 2 青藏块体东北缘重力变化等值线图(1992~2001 年)

威—永登—兰州一带形成一幅度和范围较大的重力正值异常变化区的相对集中现象; 1994~1995年, 重力变化自西南向东北逐渐增强过程中, 于武威—永登及其西南形成一对走向为北北西向的正负局部异常区, 表现了永登、天祝地震前重力变化的局部化与空间集中性; 1998~1999年, 测区西部表现为大范围的重力负值变化, 测区东部则表现为大范围的重力正值变化. 由于景泰地震震中附近无监测资料, 重力场空间分布只反映了自西向东有规律的区域性重力异常变化.

1996~1997年, 武威—兰州—天水一带形成南北向负异常带, 祁连—西宁一带形成南北向正异常带, 一负一正互相伴生的南北向重力异常带, 几乎横截北西西向构造线, 是一特殊的异常分布形态. 兰州—海原—天水负异常区的空间分布与庄浪河断裂东侧的会宁凹陷块体的空间位置基本吻合, 祁连—西宁正异常区的空间分布与庄浪河断裂西侧的冷龙岭凸起块体的空间位置基本一致. 该时段是震后重力变化, 反映了震源应力场在出现松弛情况下, 与永登、天祝地震孕育发生有关的庄浪河断裂两侧的块体边界断裂活动引起的重力效应.

3) 重力变化与构造活动的关系. 由重力变化与断裂分布可以看出: 1992~1994年, 祁连地区重力变化等值线为北西西向, 与祁连主干断裂走向基本一致; 武威—永登—兰州一带形成的重力正值异常区长轴方向为北北西向, 与庄浪河断裂走向一致; 测区东部的宁夏地区总体表现为近南北向, 与青铜峡—固原断裂走向基本一致. 1994~1995年不仅监测到整个孕震系统应力增高过程中, 深部构造活动增强引起的沿祁连山主干断裂分布的区域性重力异常, 而且还监测到与永登、天祝地震孕育发生有关的庄浪河断裂活动引起的局部重力异常区. 1998~1999年, 测区西部重力等值线走向为北西西向, 与祁连主构造断裂线方向一致; 测区东部重力等值线走向为南北向, 与青铜峡—固原断裂走向基本一致. 较好地反映了伴随景泰 5.9 级地震孕育发展过程中, 整个孕震系统上深大断裂构造活动增强引起重力变化效应. 这说明地震孕育发生过程中, 深大断裂对重力场变化形态有极强的控制作用, 重力资料能较好地反映区域构造应力场作用下, 深大断裂活动和震源应力场作用下孕震断层活动引起的重力效应.

1996~1997年的重力变化自西向东逐渐减弱, 区域重力变化与所处的布格异常背景场反向. 同时, 永登、天祝地震震中附近的局部重力异常解体, 这是永登、天祝地震后形成的震后重力变化效应. 如果从地质构造背景认真分析一下该区域的这一显著变化就不难看出, 震前(1994~1995年)的重力变化形态, 正好与震源位错的点源理论重力场的前兆图象相当(黄建梁等, 1995), 而震后的重力变化(1996~1997年)则反映了断块应力场出现松弛的重力负值变化. 这种震前震后形态上的显著差异所反映的地质构造含义不同, 震前可能是深部孕震层构造应力的相对集中, 震后调整则与庄浪河断裂两侧的块体边界断裂活动有关.

3 区域重力场的有序性演化与地震活动

地震大都发生在活动板块的边界或活动断裂带上. 在这些条带上发生突发性位移(地震)之前, 地面重力场会相继发生长、中、短、临变化, 而这些变化又与孕震过程的阶段性有关(张国民, 1996). 流动重力前兆反映一般以区域性的重力异常形式显示. 在临震前前兆现象显示出相对集中的现象, 且围绕震中区分布, 在时间上出现有序性.

3.1 重力场变化对永登 5.8 级、天祝 5.4 级地震过程的反映

1) 震前重力变化. 从图 2 可以看出, 1992~1994 年重力变化自西南向东北逐渐增强, 表现为祁连山区重力负值变化, 武威、银川盆地重力正值变化. 在自西向东有序性增强的变化中, 于武威—永登—兰州一带形成一幅度和范围较大的重力正值异常变化区, 并在庄浪河断裂带附近形成重力变化高梯度带. 1995 年 7 月发生的永登 5.8 级地震则位于重力变化高梯度带上.

2) 地震过程的重力变化. 1994~1995 年区域重力场变化空间分布, 总体仍表现自西南向东北逐渐增强的持续性变化, 但空间局部变化更加激烈, 自西向东可细分为负—正—负—正相间的重力变化. 武威—永登地区重力值由上期正值变化最大区转变为负值区, 在其西南形成一走向为北北西向的扁椭圆隆起区, 其两侧形成重力变化高梯度带. 隆起区中心与两侧的凹陷区重力变化之差较大, 达 $60 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 多. 表明震区附近同震重力变化显著. 1995 年永登地震就发生在正负异常区南缘重力变化高梯度带上. 1996 年 6 月在武威—永登异常区的西侧正负异常过渡的高梯度带上发生了天祝 5.4 级地震. 武威—永登地区附近形成的正负异常区及高梯度带, 既是永登地震同震变化引起的重力效应, 又在一定程度上反映了天祝 5.4 级地震的孕震信息.

1995~1996 年整个测区的西部重力变化平缓, 重力变化等值线表现为西南重力负值变化, 东北重力正值变化.

永登 5.8 级和天祝 5.4 级地震不仅在构造上(庄浪河断裂)有联系, 而且时间间距不到一年, 距离间距不到 100 km, 它们应属同一个地震组, 是区域应力积累过程中能量集中的两次释放.

3) 震后重力变化图象. 1996~1997 年的重力变化与 1994~1995 年的重力场变化相似, 但变化方向相反. 这是永登、天祝地震后重力变化调整的反映.

1992~1997 年的重力场动态图象较清晰地反映了本区重力场由永登、天祝地震孕育、发生的非均匀态—发震—震后恢复的演化过程.

3.2 重力场变化对景泰 5.9 级地震过程的反映

1) 准均匀态重力变化. 1997~1998 年整个测区重力场变化较为平缓. 测区西部祁连山区重力负值变化, 民乐盆地重力正值变化; 测区东部海原断裂附近存在较小范围的局部重力异常变化, 这可能与该地区 1998 年 7 月发生的海原 $M_s 4.9$ 和 1999 年 3 月发生的中宁 $M_s 4.6$ 地震有关.

2) 非均匀态重力变化. 1998~1999 年重力变化自西向东急剧增强, 表现出大范围的区域性重力异常. 测区西部表现为大范围的重力负值变化, 测区东部则表现为大范围的重力正值变化. 整个测区重力变化较大, 达 $100 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$. 测区西部重力等值线走向为北西西向, 与祁连主构造断裂线方向一致; 测区东部重力等值线走向为南北向. 2000 年 6 月在测区中部, 重力变化由负异常向正异常过渡的区域发生景泰 $M_s 5.9$ 地震.

3) 地震过程的重力变化. 1999~2000 年整个测区重力变化幅度不大, 但测区中部景泰震中附近表现出 $30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的重力差异变化, 重力变化与上期反向, 表明测区中部存在一定的同震重力效应.

4) 震后准均匀态重力变化. 2000~2001 年重力变化较为平缓, 相对差异最大值为 $30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2 \sim 40 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 表现了强震活动之后新的准均匀态重力变化.

1997~2001 年的重力场动态演化图象, 比较清晰地反映了景泰 5.9 级地震孕育发生过程中区域重力场的整体空间分布, 由“准均匀→非均匀、地震→准均匀”的系统演化过程(周硕愚等, 1997).

3.3 孕震过程中重力场动态图象特征

1) 强震发生前, 测区存在较大空间范围的区域性重力异常及与测区主要断裂构造带走向基本一致的重力变化高梯度带; 震源区形成特征性异常, 并产生与地震孕育发生有关的局部重力异常区. 由于青藏高原东北部直至祁连山的一个宽阔地带, 现代仍处于挤压变形中. 因此, 该地区出现的正负相间的重力变化图象与黄建梁等(1995)研究的挤压变形引起的空间重力变化相一致.

2) 继承性新异常特征. 1995 年永登 5.8 级地震后区域性重力异常变化仍存在, 但特征重力变化异常区和高梯度带已向北迁, 表现出 1996 年天祝 5.4 级地震的前兆信息. 因此, 当一次地震发生后, 区域重力场变化仍朝同方向持续发展, 并产生新的局部重力异常区. 表明仍存在发生中强地震的可能.

3) 震后调整变化特征. 1996~1997 年重力变化与背景场反向, 是 1995 年永登 5.8 级和 1996 年天祝 5.4 级地震连续发生后区域应力场松弛的反映, 不是新的地震前兆表现. 因此, 我们在进行重力异常识别时, 不仅要看到重力变化图象反映的非均匀程度, 还要分析重力变化的演变过程与变化趋势, 注意到重力场变化与背景场的关系.

青藏块体东北缘几次地震都发生在重力变化零值线附近, 滇西地区重力场异常变化形态与地震的关系也有这种现象(祝意青等, 2001b). 这是由于在正负重力异常变化梯度带的零线附近, 是物质密度增加与减少的过渡地带. 该处产生的物质增减差异运动剧烈, 能量易于聚集, 从而诱发地震.

4 结语

对青藏块体东北缘重力观测资料进行了统一起算基准的整体平差计算. 这种新的扩大范围的观测资料处理方法, 给我们带来新的重力变化信息. 它克服了自成体系的各个省区监测网观测信息的空间密度严重不足的缺点. 通过对这些新的重力变化信息的分析研究认为: 利用统一起算基准获得的青藏块体东北缘重力观测资料, 能较完整地反映青藏块体东北缘孕震过程中出现的流动重力前兆信息. 在地震孕育发生阶段, 青藏块体东北缘重力场出现较大范围的区域性重力异常, 重力变化高梯度带与测区主要断裂构造带走向基本一致, 并且局部地区形成特征性异常. 地震活动的平静期则没有这种现象. 青藏块体东北缘重力场动态演化图象较清晰地反映了永登 5.8 级、景泰 5.9 级地震孕育发生过程中, 区域重力场的系统演化过程.

参 考 文 献

- 魏顺民, 江在森, 张崇立. 2000. 青藏高原东北缘晚第四纪块体划分与运动态势研究[J]. 地震地质, 22(2): 219~231
- 黄建梁, 李辉, 李瑞浩. 1995. 点源位错引起的重力、位势及梯度变化[J]. 地震学报, 17(1): 72~80
- 江在森, 丁平, 王双绪, 等. 2001. 中国西部大地形变监测与地震预测[M]. 北京: 地震出版社, 129~132
- 申重阳, 李辉, 傅广裕. 2003. 丽江 7.0 级地震重力前兆模式研究[J]. 地震学报, 25(2): 163~171
- 张国民. 1996. 地震预报与震灾预测[J]. 地震地磁观测与研究, 17(3): 21~56
- 周硕愚, 梅世蓉, 施顺英, 等. 1997. 用地壳形变图象动力学研究震源复杂过程[J]. 地壳形变与地震, 17(3): 1~9

- 祝意青, 陈兵, 张希, 等. 2001a. 景泰 5.9 级地震前后的重力变化研究[J]. 中国地震, **17**(4): 356~363
- 祝意青, 江在森, 陈兵, 等. 2001b. 南北地震带和青藏块体东部重力场演化与地震特征[J]. 中国地震, **17**(1): 35~48
- 祝意青, 胡斌, 张永志. 1999. 永登 5.8 级地震前后的重力场动态图象特征研究[J]. 地壳形变与地震, **19**(1): 71~77
- 祝意青, 王双绪, 江在森, 等. 2003. 昆仑山口西 8.1 级地震前重力变化[J]. 地震学报, **25**(3): 291~297
- Li Ruihao, Fu Zhaozhu. 1983. The gravity variations before and after the Tangshan earthquake ($M=7.8$) and the dilatation process[J]. *Tectonophysics*, **97**: 159~169

GRAVITY EVOLUTION AND EARTHQUAKE ACTIVITIES OF THE NORTHEASTERN EDGE OF QINGHAI-XIZANG BLOCK

Zhu Yiqing^{1, 2)} Li Hui²⁾ Zhu Guizhi¹⁾ Xu Yunma¹⁾

1) Second Crust Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, China

2) Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

Abstract: The relationship between temporal-spatial evolution of gravity and earthquake activity during 1992~2001 has been analyzed systematically by integrally adjusting the gravity observation data of the northeastern edge of Qinghai-Xizang (Qingzang) block. The result shows that the gravity observation data of the northeastern edge of Qingzang block obtained by using the uniform starting datum can completely reflect the precursory gravity information appearing during the seismogenic process. In the genesis stage of an earthquake, regional gravity anomaly appears in a large area, resulting in related local gravity anomaly. The dynamic image of gravity field can clearly reflect the orderly evolution and earthquake activity.

Key words: northeastern edge of Qinghai-Xizang block; gravity evolution; tectonic activity; seismogenic characteristics