



www.
geojournals.cn/georev

孕震构造块体与相应地震区划分方法

吴晓娟¹⁾, 秦四清^{2,3,4)}, 薛雷^{2,3)}, 张珂^{2,3,4)}, 陈竑然^{2,3)}, 翟梦阳^{2,3,4)}

1) 北京市勘察设计研究院有限公司, 北京, 100038;

2) 中国科学院地质与地球物理研究所中国科学院页岩气与地质工程重点实验室, 北京, 100029;

3) 中国科学院地球科学研究院, 北京, 100029;

4) 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京, 100049

内容提要:可靠地划分地震区可奠定地震预测与地震危险性评价的地质基础, 具有十分重要的意义。笔者等通过分析指出板内孕震构造块体侧向边界可由区域性大断层或由区域性大断层与板块边界界定, 底边界为康拉德国或低速高导层; 板间孕震构造块体为俯冲板块, 可由区域性大断层和(或)板块边界约束; 在同一个孕震构造块体和同一轮地震周期的地震具有内在联系。因此, 地震区可定义为代表相应孕震构造块体地震活动的区域, 其可表征该块体内源自锁固段破裂的地震活动。基于笔者等提出的孕震构造块体和相应地震区边界确定原则, 把全球两大地震带(环太平洋地震带和欧亚地震带)划分为62个地震区; 每个地震区的分区方案均通过了多锁固段脆性破裂理论的检验, 这说明方案可靠。进而, 笔者等归纳总结了地震区划分方法。

关键词:孕震构造块体; 地震区划分; 区域性大断层; 板块边界; 锁固段

可靠地划分地震区可奠定地震预测与地震危险性评价的地质基础, 具有十分重要的意义。由于地震活动在空间上并非完全随机分布, 而是分布在一定的空间范围(Cornell, 1968), 因此不少学者根据地震空间分布特征给出了地震区的多种定义。例如, 陆远忠等(1985)认为地震区是地震相对密集区; 任镇寰和罗振暖(1998)把地震活动与新构造活动具有一定相关性的地区称为地震区; 王鍾琦等(1994)认为地震区是地震活动频繁而强烈的区域; 袁一凡和田启文(2012)指出, 同一地震区地震活动在时间、空间、强度上具有共同特征和相互联系; Bhasker(2013)将地震区定义为地震倾向集中的区域, 如美国中部的马德里斯地震区和瓦巴什山谷地震区。

在此基础上, 诸多地震学家亦提出了多种地震区划分方法。例如, Nishenko 和 Jacob(1990)沿太平洋板块和北美洲板块边界的大致走向划分了夏洛特皇后—阿拉斯加—阿留申地震区; Nishenko(1991)根据板块边界把环太平洋地区划分为智利地震区、秘鲁地震区等; Markušić 和 Herak(1998)利用地震

地质资料和地球物理数据, 把克罗地亚及其邻区划分为17个地震区; 有些学者(Kelson et al., 1996; Kenner and Segall, 2000; Grollimund and Zoback, 2001; Tuttle et al., 2002)在研究1811~1812年美国新马德里3次大地震时, 把密苏里州、阿肯色州、田纳西州和肯塔基州交界区域划分为新马德里地震区; Bus 等(2000)认为地震区应根据震中分布和该地区已知断层性质(数量、走向、长度)进行划分; Cid 等(2001)利用数值模拟方法把巴塞罗那市划分为4个地震区; Muço 等(2002)根据地震构造和地震空间分布资料, 把阿尔巴尼亚地区划分为8个地震区; Magsi(2014)指出, 地震区划分应考虑深部构造、区域构造、地壳形变强度、地球物理参数、震源深度与地震烈度资料; 有些地震学家(Bufe and Varnes, 1993; Papazachos and Papazachos, 2000, 2001; 彭克银等, 2003; Scordilis et al., 2004; Bowman et al., 2012)提出了孕震区域临界半径与震级的统计关系式, 通过对比不同的搜索半径筛选最优地震区, 但据其划分的地震区很有可能横穿区域性大断

注: 本文为第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(编号: 2019QZKK0904)和国家重点研发计划资助项目(编号: 2019YFC1509701)的成果。

收稿日期: 2020-05-03; 改回日期: 2020-12-09; 网络首发: 2021-02-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.02.004

作者简介: 吴晓娟, 女, 1985年生, 博士, 主要从事工程地质、岩石破裂失稳机理研究; Email: xiaowabj@163.com。通讯作者: 秦四清, 男, 1964年生, 研究员, 主要从事工程地质、非线性岩土力学与岩土工程、大地震物理预测研究; Email: qsqhope@mail.iggcas.ac.cn。

层(块体边界断层),导致把属于不同构造块体的地震归为一起。

尽管前人划分地震区的方法不同,但主要目的一致,即通过统计分析区内的地震活动评价地震危险性。这意味着在同一个地震区内的地震存在潜在关联性。然而,根据上述方法划分的地震区在空间区域界定上具有强人为性和不确定性,其不仅缺乏严格且统一的地质依据,而且未采用科学理论检验分区方案的可靠性和合理性,以至于很有可能将不相关的地震划分到同一个地震区,或者出现地震区重叠现象。这会导致两个问题:①不能可靠地确定监测数据的空间统计范围;②难以区分地震事件类型和界定地震周期。

在笔者等以前的工作中,基于当时还不够完善的多锁固段脆性破裂理论(秦四清等,2010),曾初步提出了表征构造块体内部地震活动关联性的地震区划分方法(秦四清等,2015a,b,2016a,b,c),但尚未妥善解决孕震构造块体(孕育且发生较大地震的块体)和相应地震区边界确定原则这一关键问题。随着该理论的逐渐完善,目前其能很好地描述浅源、中源与深源构造地震产生过程(吴晓娟等,2016;杨百存,2019)。鉴于此,本文将在以前工作基础上,根据该理论与大地构造学说,阐明孕震构造块体和相应地震区边界确定原则,并结合全球两大地震带地震区的分区实践提出更为系统完善的地震区划分方法。

1 理论依据

1.1 多锁固段脆性破裂理论

锁固段(秦四清等,2010;陈竑然等,2019)是构造块体内承受应力集中且具有高承载力的地质结构(图1和图2),常赋存于断层中或由断层围限而成;其主控构造地震产生,即不同规模的脆性破裂产生不同量级的地震。大尺度、扁平状的锁固段承受极其缓慢的剪切加载且处于高温高压环境,导致其具有强非均匀性和低脆性(陈竑然等,2019;杨百存,2019;杨百存等,2020),应呈现特定的断裂前兆和破裂演化规律。一些

学者(秦四清等,2010;薛雷等,2018;陈竑然等,2019;杨百存,2019)阐明锁固段体积膨胀点处的高能级破裂事件为可判识断裂前兆,且体积膨胀点和峰值强度点之间的地震序列呈现“两头大、中间小”模式;定义发生在锁固段体积膨胀点和峰值强度点处的地震为标志性地震,两点之间的地震为预震,临近峰值强度点的预震为前震;发现在同一个地震区和同一轮地震周期,标志性地震的演化遵循如下指数律:

$$\varepsilon_f(k) = 1.48^k \varepsilon_c \tag{1}$$

式中, ε_c 为第1锁固段体积膨胀点处标志性地震的临界剪切应变值, $\varepsilon_f(k)$ 为第k锁固段峰值强度点处标志性地震的临界剪切应变值。式(1)说明,标志性地震的演化遵循确定性规律,故其具有可预测性。

Benioff应变为地震波辐射能的平方根(Benioff,1951),可根据震级与辐射能关系求得,累积Benioff应变(CBS)为Benioff应变之和。由于CBS比正比于剪切应变比(杨百存,2019;杨百存等,2020),则式(1)可变为:

$$S_f(k) = 1.48^k S_c \tag{2}$$

式中, S_c 为第1锁固段体积膨胀点处标志性地震的临界CBS值, $S_f(k)$ 为第k锁固段峰值强度点处标志性地震的临界CBS值。

由于某一地震区当前地震周期的地震目录通常包含与锁固段脆性破裂无关的地震事件,因此秦四清等(2015c)设置最小有效性震级 M_v 以确定锁固段破裂事件的门槛震级。考虑到第1锁固段体积膨胀点前不小于 M_v 的地震目录通常不完整,

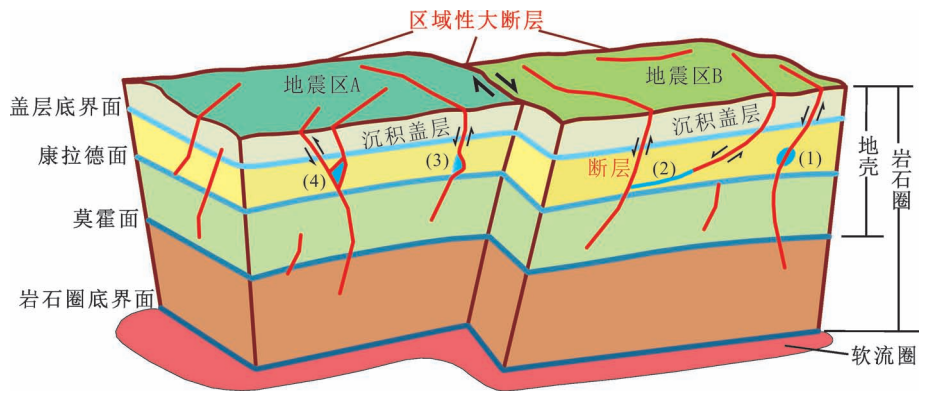


图1 板内构造块体、地震区与锁固段示意图

Fig. 1 Schematic illustration of intraplate tectonic blocks, seismic zones and locked segments
(1) 岩桥; (2) 断层中的坚固体; (3) 凹凸体; (4) 断层所围限的块体
(1) A rock bridge; (2) a strong junction of two intersecting faults; (3) an asperity; (4) a block bounded by faults

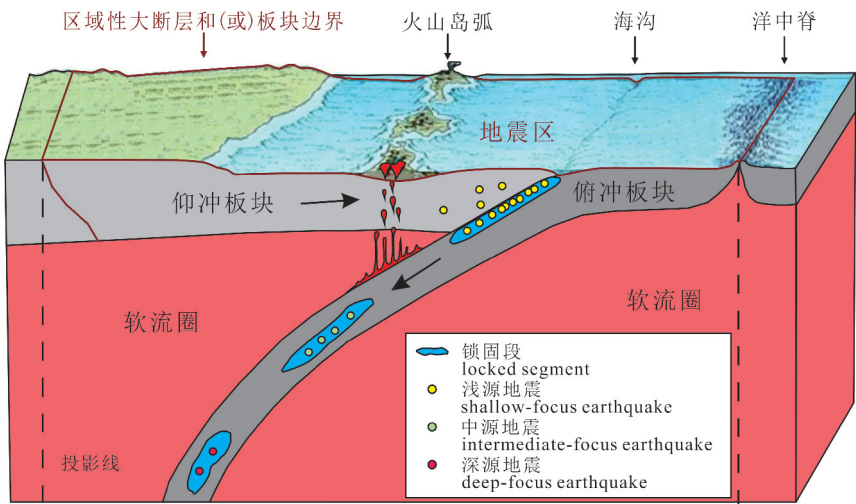


图 2 板间构造块体、地震区与锁固段示意图
Fig. 2 Schematic illustration of interplate tectonic blocks, seismic zone and locked segments

初始 CBS 误差可能出现,秦四清等(2010)导出了如下误差修正公式:

$$\Delta = \frac{S_f^*(1) - 1.48 S_c^*}{0.48} \tag{3}$$

式中, Δ 为误差值, S_c^* 和 $S_f^*(1)$ 分别为误差修正前第 1 锁固段体积膨胀点和峰值强度点处标志性地震的临界 CBS 监测值。

进行误差修正后,可把第 1 锁固段体积膨胀点处标志性地震的临界 CBS 值作为已知值,据式(2)可预测后续标志性地震的临界 CBS 值。

若在某地震区的当前地震周期共发生了 n 次标志性地震,那么第 n 次标志性地震为主震。在统一震级标度情况下,对第 i 次到第 $i + j$ 次标志性地震,当 $M_{i+j} < M_i$, 其震级的下限约束(秦四清等, 2016c) 满足:

$$M_i - M_{i+j} \leq 0.2 \quad (1 \leq i \leq n - 2, j \geq 1 \text{ 和 } i + j \leq n - 1) \tag{4}$$

对两次相邻标志性地震,当 $M_{i+1} \geq M_i$,其震级的上限约束满足:

$$M_{i+1} - M_i \leq 0.5 \quad (1 \leq i \leq n - 2) \tag{5}$$

对相邻标志性地震之间的预震,其震级的上限约束满足:

$$M_p \leq \min(M_i, M_{i+1}) - 0.2 \quad (1 \leq i \leq n - 1) \tag{6}$$

式中, M_i 、 M_{i+j} 和 M_{i+1} 分别表示第 i 次、第 $(i + j)$ 次和第 $(i + 1)$ 次标志性地震的震级。

当最后一个锁固段被加载至峰值强度点发生断

裂时,主震发生。经理论推导(杨百存等,2020),可得到如下主震判别准则:

$$M_n - M_{n-1} > 0.5 \tag{7}$$

式中, M_n 和 M_{n-1} 分别表示主震和最后一个锁固段体积膨胀点处标志性地震的震级。

鉴于震级测定值存在误差,且目前不同地震台网给出的地震震级值均保留一位小数,当两次相邻标志性地震的震级差接近 0.5 时,根据式(7)容易误判主震。为此,建议根据特定地震区某次标志性地震后的地震活动特征做进一步判断(薛雷等,2018)。若后续不小于 M_v 的地震初期集中发生于该标志性地震震中附近的较

小区域,之后随时间延续地震活动趋于平静,则可确认该标志性地震为主震;若后续不小于 M_v 的地震在该地震区内随机发生且保持活跃,则可认为该标志性地震不为主震(杨百存等,2020)。此时应参考不同地震台网对该震的测定值,根据式(5)修订震级。

1.2 大地构造学说

Carlson(1989)认为大地震的发生仅与某特定断层(带)相关,并且认为断层(带)之间并无影响。然而,实则不然。例如,傅承义等(1979)认为地震时能量的释放固然集中在断层错动的地方,但能量积累所涉及的范围却大得多,因此不应将注意力仅仅集中在发震断层附近;有些学者(Brent, 2017; Hamling et al., 2017; Mason, 2017)指出 2016 年新西兰卡弗登 $M_w 7.8$ 地震涉及到的断层多达十几条;马瑾(1999)强调中国大陆地震在空间上呈片状分布,因此在分析地震活动时要从以活动断层为中心转变为以活动地块为中心。鉴于此,研究地震成因机制时,不应仅研究发震断层(带),还应考虑其它断层(带)的参与作用,即需要研究孕震构造块体和相应地震区的划分。

板块构造理论(Wilson, 1965; McKenzie and Parker, 1967; Le Pichon, 1968; Morgan, 1968)认为岩石圈可分为多个不同大小的板块,其是相对刚性和相对稳定的岩石圈块体,在软流圈表面上作相对运动;板块边界分为离散型(以海岭和裂谷为边界)、

汇聚型(以岛弧—海沟、山弧—海沟、山弧—地缝合线和地中海型陆间海为边界)和剪切转换型(转换断层带)。板块边界类型决定了板间地震活动的分布及其强弱(邓起东等,2009)。

断块构造学说(张文佑等,1978;张文佑,1984)认为,岩石圈被断层分割成大小不等、深浅不一、厚薄不同和发展历史各异的断块,由此构成岩石圈的多层、多级和多期发展的断块构造格局(图3);“板块”是最高一级的断块——“岩石圈断块”。他根据断层深度将断层分为:①盖层断层:切穿沉积盖层到达结晶基底(花岗岩质层或硅铝层)顶面的断层;②基底断层:切穿基底到达玄武岩质层(硅镁层)顶面的断层;③地壳断层:切穿整个地壳到达上地幔顶部的断层;④岩石圈断层:切穿整个岩石圈到达软流圈顶面的断层。此外,黄汲清等(1977)将切穿岩石圈、深入软流圈的断层定义为超岩石圈断层,其是规模最大的第一级深断层,一般构成大陆与大洋之间的分界。

邓起东等(2009)指出,断块构造是地球构造运动最基本的型式,活动断块是现今构造运动最基本的型式,其既控制主要活动构造带和地震活动带的分布,也控制不同地区地震活动特征的差异;据此,他们编制了中国活动断块划分图。然而,其划分的活动断块是否为相对独立的构造单元,即断块内的地震活动是否存在关联,尚不清楚,亟需发展可靠的方法予以判定。

2 孕震构造块体和相应地震区边界确定原则

笔者等认为,板块构造理论和断块构造学说各有优势,前者可作为划分板间构造块体的地质依据,

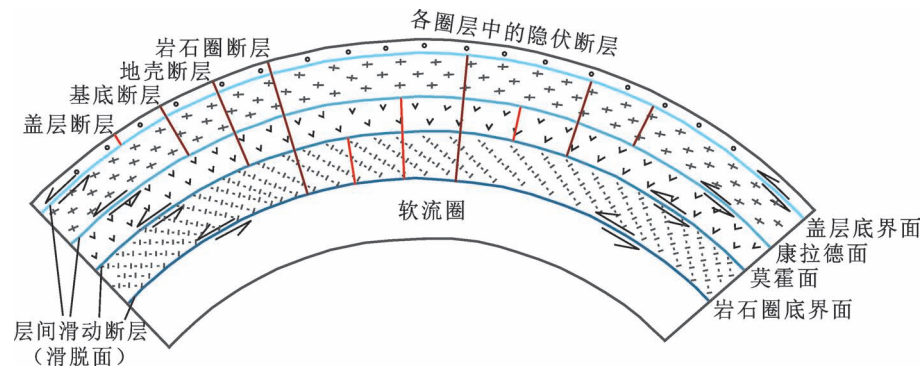


图3 岩石圈内不同层级断块示意图(据张文佑等,1978 修改)

Fig. 3 Schematic illustration of hierarchical fault-blocks in the lithosphere
(modified after Zhang Wenyu et al., 1978#)

后者可作为划分板内构造块体的地质依据,两者均可作为划分相应地震区提供理论指导。

2.1 板内孕震构造块体和相应地震区边界确定原则

某条断层在构造变形与地质演化中所起的作用,主要取决于其切割深度和规模,且断层在平面上的延伸与影响范围,一般也与其深度成正相关。大规模的基底断层、地壳断层、岩石圈断层和超岩石圈断层,往往是构造块体间相对交错运动的构造大变形地带,其可被定义为区域性大断层。如上所述,地球岩石圈由被不同尺度断层(带)分割、可相对运动的层级构造块体组成,如构造板块(Wilson, 1965)、断块(张文佑,1984)与活动地块(张培震等,2003)。特别地,被区域性大断层围限而成的构造块体,由于其内部变形远小于区域性大断层的构造变形,故其基本上作为一个单元运动(Keilis-Borok and Soloviev, 2003),这说明区域性大断层可作为块体侧向边界。由此而论,板内构造块体可由区域性大断层或由区域性大断层与板块边界界定。

自从板块构造理论被广为认可后,岩石圈底界面一直被认为是板块运移的主要滑脱面,甚至是惟一滑脱面(万天丰,2004)。然而,在大陆岩石圈构造研究中,诸多学者(金翔龙和高金耀,2001;许志琴等,2003;万天丰,2012;焦煜媛等,2017)逐渐认识到岩石圈内还存在其他滑脱面(图1和图3),如康拉德面和莫霍面,有可能沿其发生不同程度的滑脱。

板内构造块体是否易沿某滑脱面滑脱,取决于该面的发育程度、该面的摩擦阻力与施加的切向构造荷载;而块体能否发生较大地震,则取决于其能否沿滑脱面发生较大的相对运动和其内是否存在锁固段。鉴于此,需厘清块体沿某滑脱面的易滑脱性和块体内锁固段的存在性,即需确定孕震构造块体底边界。

盖层断层切割范围仅局限于地壳表层的沉积岩层,盖层范围内岩石较破碎,其通常不发生较大地震;其下才是完整性较好、强度大的花岗岩层主体,是大地震震源孕育的层位(秦保燕,1999)。因此,笔者等认为盖层构造块体中不存在锁固段,但可能存在非锁固段(承载力介于锁固段和软弱介质之间;杨百存等,

2020),其破裂会发生较小地震。这说明盖层构造块体不能作为孕震构造块体,即其底部滑脱面(盖层底界面)不能作为孕震构造块体的底边界。

不少学者 (Meissner et al., 1987; Mooney and Braile, 1989; 曾融生等, 1995; 朱介寿等, 1997; Artemieva and Thybo, 2013; Reguzzoni et al., 2013; 郝天珲等, 2014) 研究了全球莫霍面深度变化, 发现大部分地区莫霍面的起伏变化较大, 且有些地区莫霍面呈现非常明显的“波浪式”起伏 (王红霞和郭玉贵, 2005; 罗艳等, 2008; 胡卫剑等, 2014), 故十分不利于构造块体沿莫霍面滑脱, 这说明该面亦难以作为孕震构造块体底边界。

徐常芳 (1996) 指出, 构造活动和地震活动较强的地区, 常发育中地壳低速高导层 (地震波速低、电导率高), 其深度与康拉德面有较好的对应关系, 该层以上地震活动强烈, 以下以韧性变形和显著流变为主 (周真恒等, 1998), 构造变形的强度显著变弱, 是很少发生地震的圈层; 万天丰 (2004) 认为, 从与地表贯通的断层和相关岩浆活动的地质证据来看, 中国大陆中地壳低速高导层是主要的滑脱面, 滑脱量最为显著, 而沿盖层与基底之间界面的滑脱量以及沿莫霍面的滑脱量可能较小; 顾芷娟等 (1995) 认为低速高导层在世界各地广泛存在。在低速高导层的物理力学性质研究方面, 杨晓松等 (2003) 指出, 地壳中部的低速高导层很可能具有力学软弱带的物理内涵, 可作为滑脱面; 一些学者 (胡德昭等, 1989; 顾芷娟等, 1995; 范景辉, 2002) 的研究表明, 低速高导层有一定厚度且含水, 与莫霍面相比较软弱, 在较小的上覆压力下构造块体易沿该层滑脱。

从震源深度来看, 笔者等推测全球板内较大构造地震主要位于康拉德面或低速高导层之上。例如, 唐新功等 (2012) 指出青藏高原山区康拉德面深度和莫霍面深度分别约为 35 km 和 67 km, 罗文行等 (2008) 指出该区不小于 5 级地震的震源深度主要分布在 10~35 km; 李松林等 (2001) 指出首都圈地区康拉德面和莫霍面深度分别为 21~25 km 和 31~42 km, 陈向军等 (2018) 指出新疆地区康拉德面和莫霍面深度分别为 22~30 km 和约 54 km, 笔者等通过查阅地震目录得知这两个地区不小于 $M_s 5.5$ 地震主要位于康拉德面之上。这意味着: ①即使下地壳硅镁层中发育有锁固段, 但由于在更高的温压环境下其承载力大幅减小, 即其已退化为非锁固段, 也难以发生较大地震; ②锁固段分布在盖层底部滑脱面和康拉德面或低速高导层之间; ③孕震构造块体

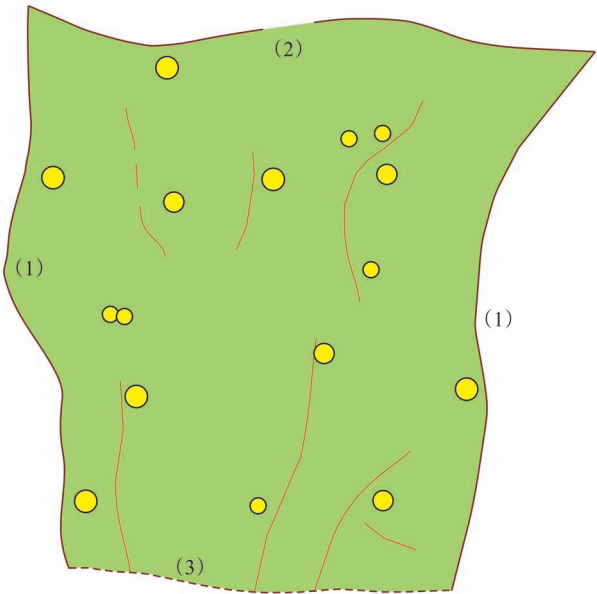


图 4 板内地震区的 3 种类型边界断层
(黄圈表示地震)

Fig. 4 Three types of boundary faults in an intraplate seismic zone (Earthquakes are denoted by yellow circles)
(1) 基本连续断层; (2) 不连续断层; (3) 隐伏断层
(1) An almost continuous fault; (2) a discontinuous fault;
(3) a blind fault

不应包括康拉德面或低速高导层以下的圈层。

综上, 康拉德面或低速高导层可作为孕震块体底边界。由此而论, 只要是切穿基底的大规模断层, 均可视为广义上的区域性大断层, 皆可作为孕震构造块体侧向边界。显然, 这样厘定的孕震构造块体涉及到非锁固段破裂 (地震) 事件, 故在数据处理时应尽量剔除这些事件, 这可通过引入门槛震级 M_c 实现。

根据区域性大断层线 (断层与地面的交线) 确定地震区范围时, 常遇到 3 种类型边界 (许才军等, 2009; 图 4), 须分情况处理: ①基本连续断层 (成熟边界): 其通常能切穿地壳或整个岩石圈, 划分地震区时应首选该类断层为边界; ②不连续断层 (发展中边界): 根据断层延伸方向连接断层线端点, 可形成封闭的地震区边界; ③隐伏断层: 连接已有断层线端点可形成封闭的地震区边界, 其连线能大致代表隐伏断层走向。

2.2 板间孕震构造块体和相应地震区边界
确定原则

鉴于板间构造块体涉及到俯冲板块和仰冲板块 (图 2), 故需厘清赋存有锁固段的板块, 才能明确孕震构造块体。一些学者 (Stern, 2002; 洪汉净等,

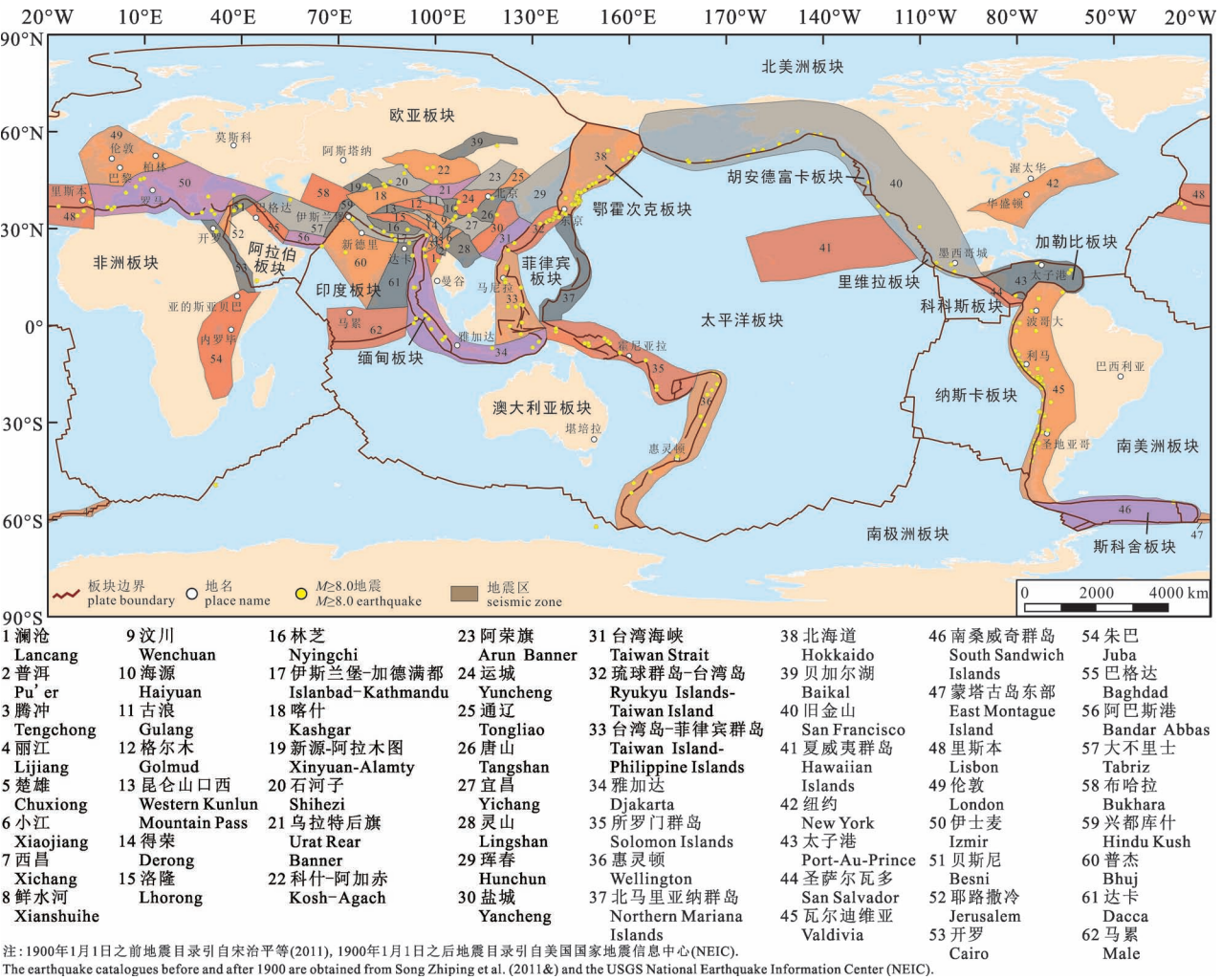


图 5 全球两大地震带地震区划分图(据秦四清等,2016d)

Fig. 5 Seismic zoning map of two major seismic belts (the Circum-Pacific seismic belt and the Eurasia seismic belt) worldwide (from Qin Siqing et al. , 2016d&)

2009;董金龙等,2015;Lay,2015)指出板间地震沿板块边界呈带状分布,其产生和分布主要受俯冲板块控制,这意味着锁固段分布在其内,即俯冲板块为孕震构造块体。鉴于此,且参考上述板内构造块体侧向边界确定原则,笔者等认为板间地震区边界可由区域性大断层和(或)板块边界约束,且应优先考虑汇聚型板块边界约束。以此为指导,则可按如下原则制订板间地震区的分区方案:①若某板块周围均有板块边界,如鄂霍次克板块,则可据其且囊括主要汇聚型边界附近较大地震确定地震区边界;②若主要汇聚型边界周围有区域性大断层和其他板块边界,以后两者作为地震区边界;③若边界断层资料缺失,可沿主要汇聚型板块边界延伸方向且囊括其两侧或单侧较大地震初划地震区,进而考虑相邻地震区的地震强度和(或)震源深度的显著差异性厘清

相邻边界,最终确定相邻地震区各自的分区方案。

因为这样划分的地震区涉及到俯冲板块和仰冲板块(常赋存有非锁固段)两个构造块体,而地震区应仅涉及前者且应表征前者的地震活动,故在数据处理时应尽量剔除后者的地震事件,这可通过引入门槛震级 M_v 实现。

3 地震区划分方法

显然,在同一个孕震构造块体和同一轮地震周期的地震具有内在联系;相邻块体通过剪切和(或)挤压产生相互作用,但各块体的地震(不小于 M_v)演化规律互不影响。因此,地震区是代表相应孕震构造块体地震活动的区域,其可表征相应块体内源自锁固段破裂的地震活动。

基于上述孕震构造块体和相应地震区边界确定

原则,笔者等以全球两大地震带(环太平洋地震带和欧亚地震带,图 5)为研究对象,参考《中国活动构造图》(邓起东等,2007)、《中国新疆及邻区地震构造图》(沈军,2014)、《亚欧地震构造图》(张裕明等,1981)、《全球构造体系图》(苗培实,2010)、《亚欧地质图》(李廷栋等,1997)、《Active faults of the world》(Yeats, 2012)等资料,共划分了 62 个地震区(图

5),其中包括中国及其邻区的 33 个地震区(图 6)。
若上述全球两大地震带每个地震区的分区方案可靠,则均能通过多锁固段脆性破裂理论的检验。笔者等对 62 个地震区的震例分析表明,全部分区方案均通过了理论检验,即不仅每个地震区历史标志性地震的演化能够被回溯(秦四清等,2016a,b,c),而且对某些地震区标志性地震的前瞻性预测也已得

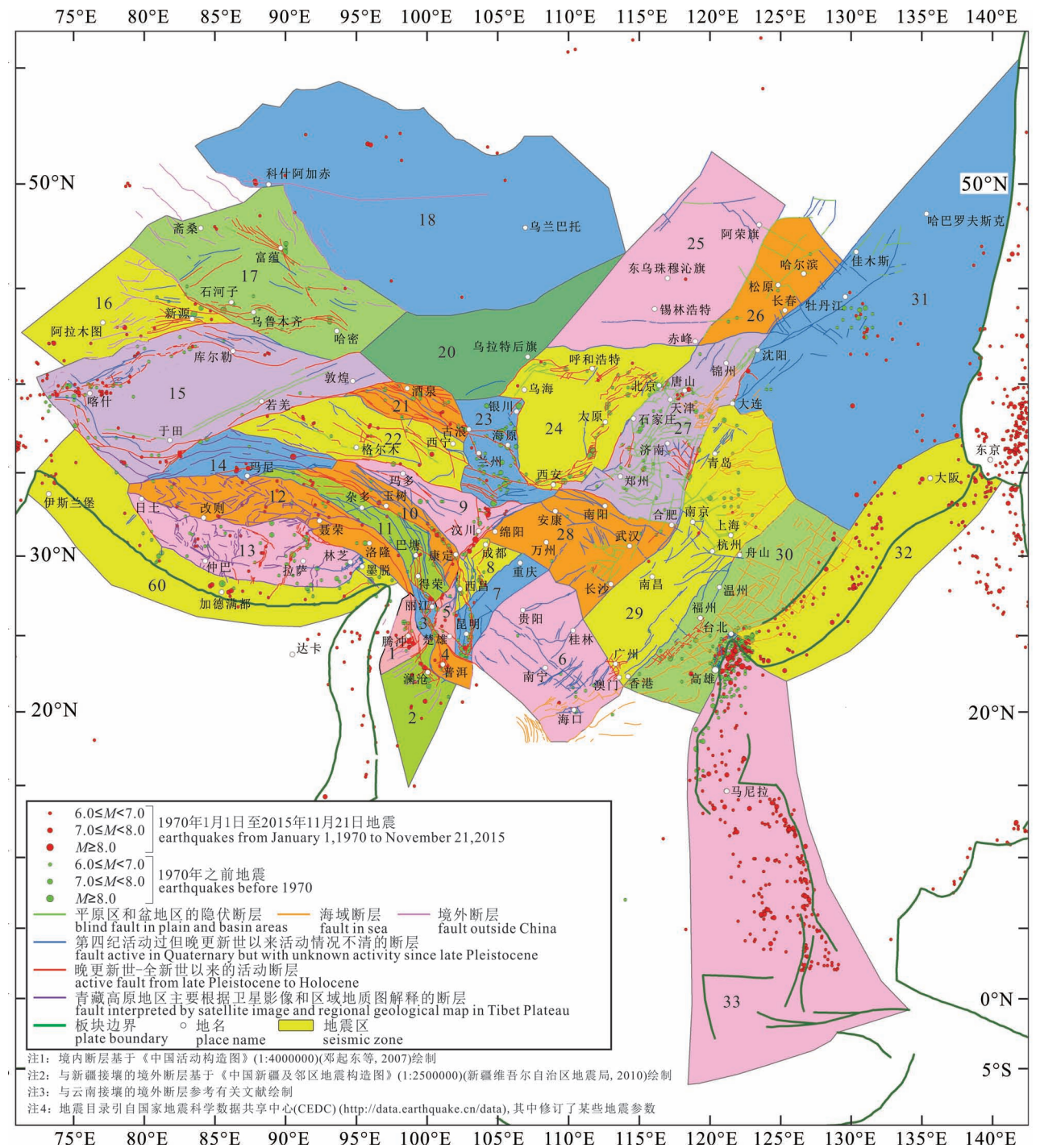


图 6 中国及其邻区地震区划分图(据秦四清等,2016b,d)
Fig. 6 Seismic zoning map in China and its neighboring areas (from Qin Siqing et al. , 2016b&, d&)

到证实(秦四清等,2011,2012,2013,2014a,b,c;杨百存等,2018)。

结合全球两大地震带地震区的分区实践,笔者等归纳总结出地震区划分方法的要点为:

(1)以地质构造和地震资料为参考,以孕震构造块体和地震区边界确定原则为依据,以保证地震区之间不重叠和“无缝衔接”为宗旨,初定多个地震区的分区方案;

(2)根据多锁固段脆性破裂理论检验每个地震区的分区方案可靠性。若其中一个或几个地震区的分区方案未通过检验,则按要点(1)重新厘定边界,直至全部方案均通过检验,这样可确定最终方案。在边界断层为不连续或隐伏的情况下,可进行如下操作:对不连续断层,当断层线端点之间的连线上或连线附近有较大地震分布时,根据该理论判断地震的归属,据此可微调边界;对隐伏断层,连接已有断层线端点的连线方式亦可照此进行。当然,若后续研究揭示了隐伏断层分布,则据此确定边界。

以下,以北海道板间地震区和运城板内地震区为例,具体阐述该方法的实施步骤。

(1)北海道地震区。该地震区位于欧亚板块、北美洲板块、太平洋板块与菲律宾板块之间,几乎对应鄂霍次克板块。由于该板块周围存在清晰的板块边界,据此且考虑较大的地震分布可确定地震区范围(图7或图5中编号38)。以下,将通过多锁固段脆性破裂理论检验该地震区的分区方案可靠性。

该地震区当前地震周期曾发生标志性地震3次,分别为1898年6月5日日本海沟 M_{uk} 8.7地震、1952年11月4日堪察加东部近海 M_{w} 8.9地震和2011年3月11日日本宫城东部近海 M_{w} 9.0地震(杨百存,2019)。由图8看出,经误差修正后该地震区当前地震周期标志性地震的临界CBS值很好地满足式(2)。需指出的是,1933年3月2日日本海沟 M_{w} 8.5地震,是1952年标志性地震前的1次显著预震;1963年10月13日千岛群岛 M_{w} 8.5地震,是2011年标志性地震前的1次显著预震(秦四清等,2016a)。这两次预震是不同锁固段破裂发生的最大预震。显然,标志性地震的震级满足式(5),预震的震级满足式(6)。因此,无论从标志性地震演化规律上看,还是从震级约束关系上看,北海道地震区的分区方案可靠,可据之预测未来的标志性地震。

(2)运城地震区。运城地震区(图9或图5和图6中编号24)的边界断层为八里罕断层、太行山

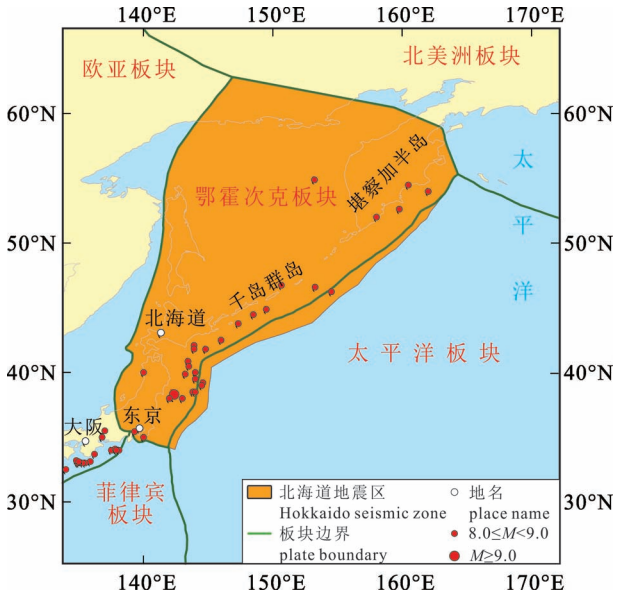


图7 北海道地震区地震构造图
Fig. 7 Seismotectonic map of the Hokkaido seismic zone

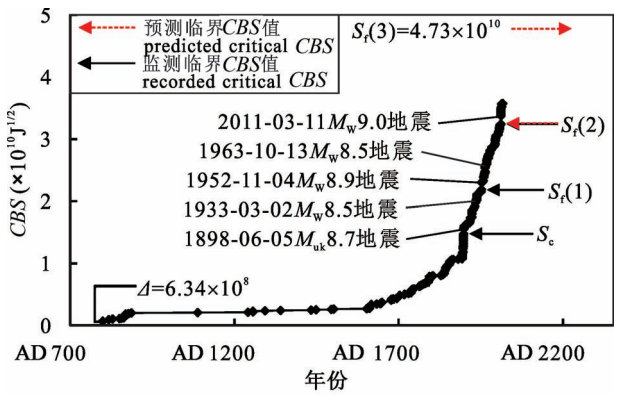


图8 考虑误差 Δ 修正后北海道地震区当前地震周期公元144年2月15日~2016年2月24日之间 $M_{\text{w}} \geq 7.0$ ($M_{\text{v}} = M_{\text{w}} 7.0$)地震的CBS与时间关系
Fig. 8 Time variations of CBS of $M_{\text{w}} \geq 7.0$ ($M_{\text{v}} = M_{\text{w}} 7.0$) earthquakes from February 15, 144 to February 24, 2016, in the Hokkaido seismic zone and its current seismic period after introducing the initial error Δ

山前断层、太行山大断层、封门口—五指岭断层、温塘断层、华山山前断层、华山西麓断层、秦岭北麓断层、陇县—宝鸡断层、六盘山断层、黄河—灵武断层、正谊关断层、巴彦乌拉山断层、狼山山前断层和阴山—燕山断层。其中,阴山—燕山断层为岩石圈断层(张文佑等,1983);黄河—灵武断层深度大于40 km,向下切割了莫霍面(雷启云等,2014);华山山前

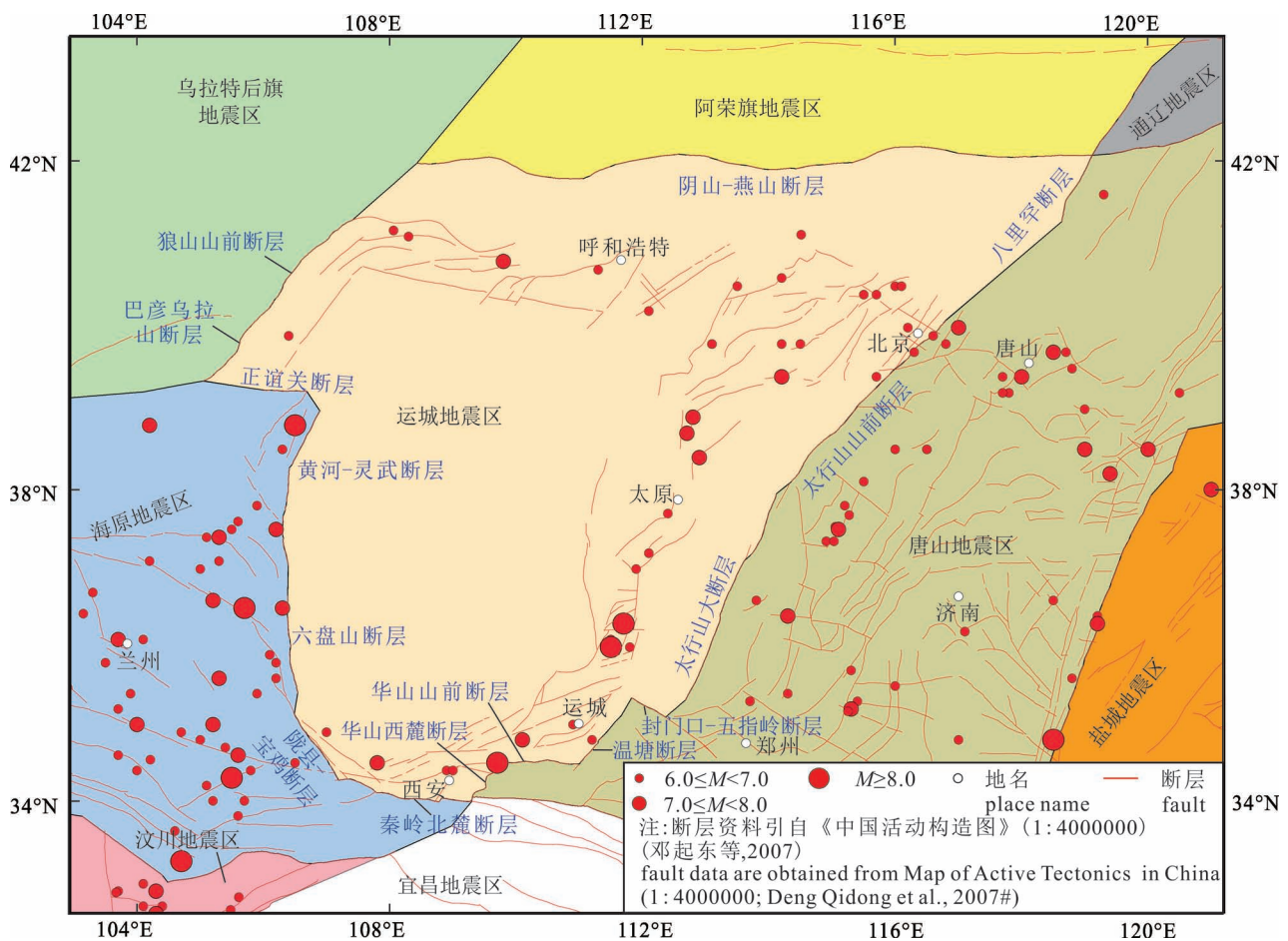
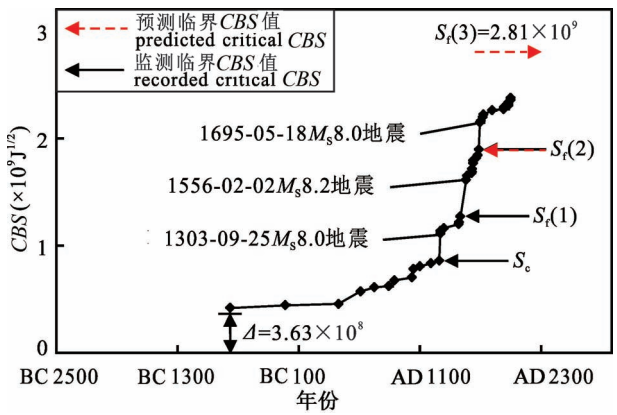


图 9 运城地震区及其相邻地震区地震构造图

Fig. 9 Seismotectonic map of the Yuncheng seismic zone and its neighboring seismic zones

断层为岩石圈断层(任隽,2012);太行山山前断层已切穿莫霍面(李志伟等,2006;张岭等,2007;吕作勇和吴建平,2010),为一岩石圈断层;太行山大断层为一深大断层,深切莫霍面(曹现志等,2013;于洋,2016)。以下,将通过多锁固段脆性破裂理论检验该地震区的分区方案可靠性。



该地震区当前地震周期曾发生标志性地震 3 次,分别为 1303 年 9 月 25 日山西洪洞 $M_s8.0$ 地震、1556 年 2 月 2 日陕西华县 $M_s8.2$ 地震和 1695 年 5 月 18 日山西临汾 $M_s8.0$ 地震;该区历史上预震的震级不超过 $M_s7.0$ (杨百存,2019)。由图 10 看出,经误差修正后该地震区当前地震周期标志性地震的临界 CBS 值很好地满足式(2);此外,标志性地震和预震的震级分别满足式(5)和(6)。这说明运城地震区的分区方案可靠,可据之预测未来的标志性地震。

图 10 考虑误差 Δ 修正后运城地震区当前地震周期公元前 2300~2015-11-21 之间 $M_s \geq 6.0$ ($M_v = M_s6.0$) 地震的 CBS 与时间关系

Fig. 10 Time variations of CBS of $M_s \geq 6.0$ ($M_v = M_s6.0$) earthquakes from 2300 B. C. to November 21, 2015, in the Yuncheng seismic zone and its current seismic period after introducing the initial error Δ

4 结 论

(1)提出了孕震构造块体和相应地震区边界确定原则,并结合全球两大地震带地震区的分区实践归纳总结了地震区划分方法。

(2)本文划分的 62 个地震区,奠定了地震预测和地震危险性评价的地质基础。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

曹现志, 李三忠, 刘鑫, 索艳慧, 赵淑娟, 许立青, 戴黎明, 王鹏程, 余珊. 2013. 太行山东麓断裂带板内构造地貌反转与机制. 地学前缘, 20(4): 88~103.

陈竑然, 秦四清, 薛雷, 杨百存, 张珂. 2019. 锁固段之间的力学作用模式. 工程地质学报, 27(1): 1~13.

陈向军, 上官文明, 宋秀青. 2018. 新疆地区一维地壳速度模型研究. 地震工程学报, 40(2): 294~304.

邓起东, 冉永康, 杨晓平, 闵伟, 楚全芝. 2007. 中国活动构造图(1: 400 万). 北京: 地震出版社.

邓起东, 高翔, 杨虎. 2009. 断块构造、活动断块构造与地震活动. 地质科学, 44(4): 1083~1093.

董金龙, 胡修举, 邹常伟. 2015. 全球地震及火山的分布特征及其变化关系. 首都师范大学学报(自然科学版), 5: 87~90.

范景辉. 2002. 康定群斜长角闪岩脱水熔融实验研究及康滇构造带壳内低速层成因初步探讨. 导师: 马胜利, 刘力强, 杨晓松. 北京: 中国地震局地质研究所硕士学位论文: 1~60.

傅承义, 陈运泰, 陈颙. 1979. 我国的震源物理研究. 地球物理学报, 22(4): 315~320.

顾芷娟, 郭才华, 李彪, 肖晓辉, 张兆忠, 周召林. 1995. 壳内低速高层成因初步探讨. 中国科学(B 辑), 25(1): 108~112.

郝天珧, 胡卫剑, 邢健, 胡立天, 徐亚, 秦静欣, 刘少华, 雷受旻. 2014. 中国海陆 1: 500 万莫霍面深度图及其所反映的地质内涵. 地球物理学报, 57(12): 3869~3883.

洪汉净, 陈会仙, 赵焄, 胡久常. 2009. 全球地震、火山分布及其变化特征. 地震地质, 31(4): 573~583.

胡德昭, 恽玲舸, 姜永基, 王良书, 徐鸣洁. 1989. 中国东南部的壳内低速层与康拉德面. 石油实验地质, 11(4): 331~340.

胡卫剑, 郝天珧, 秦静欣, 李志伟, 江为为, 姜迪迪, 邢健, 胡立天, 徐亚, 雷受旻. 2014. 中国海陆莫霍面及深部地壳结构特征——以阿尔泰—巴士海峡剖面为例. 地球物理学报, 57(12): 3932~3943.

黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 张之孟, 许志琴. 1977. 中国大地构造基本轮廓. 地质学报, 51(2): 117~135.

金翔龙, 高金耀. 2001. 西太平洋卫星测高重力场与地球动力学特征. 海洋地质与第四纪地质, 21(1): 1~6.

焦煜媛, 沈旭章, 李秋生. 2017. 青藏高原东北缘康拉德界面存在的地震学证据及构造意义初探. 地球学报, 38(4): 469~478.

雷启云, 柴炽章, 郑文俊, 杜鹏, 谢晓峰, 王银, 崔瑾, 孟广魁. 2014. 钻探揭示的黄河断裂北段活动性和滑动速率. 地震地质, 36(2): 464~477.

李松林, 张先康, 宋占隆, 石金虎, 邓宏钊, 杨健, 张成科, 任青芳. 2001. 多条人工地震测深剖面资料联合反演首都圈三维地壳结构. 地球物理学报, 44(03): 360~368+438.

李廷栋, 耿树方, 严克明, 范本贤, 陈炳蔚. 1997. 亚欧地质图. 北京: 地质出版社.

李志伟, 胥颐, 郝天珧, 刘劲松, 张岭. 2006. 环渤海地区的地震层析成像与地壳上地幔结构. 地球物理学报, 49(3): 797~804.

陆远忠, 陈章立, 王碧泉. 1985. 地震预报的地震学方法. 北京: 地震出版社: 1~268.

罗文行, 李德威, 汪校锋. 2008. 青藏高原板内地震震源深度分布规律及其成因. 地球科学—中国地质大学学报, 33(5): 618~626.

罗艳, 崇加军, 倪四道, 陈棋福, 陈颐. 2008. 首都圈地区莫霍面起伏及沉积层厚度. 地球物理学报, 51(4): 1135~1145.

吕作勇, 吴建平. 2010. 华北地区地壳上地幔三维 P 波速度结构. 地震学报, 32(1): 1~11.

马瑾. 1999. 从断层中心论向块体中心论转变——论活动块体在地震活动中的作用. 地学前缘, 6(4): 173~180.

苗培实. 2010. 全球构造体系图. 北京: 地震出版社.

彭克银, 尹祥础, 和锐. 2003. 用临界点理论讨论应变能加速释放现象和孕震区尺度. 中国地震, 19(4): 425~430.

秦保燕. 1999. 我国大陆地震深度与地震成因关系研究的回顾. 见: 陈运泰. 主编. 中国地震学会成立 20 周年纪念文集. 北京: 地震出版社: 1~538.

秦四清, 徐锡伟, 胡平, 王媛媛, 黄鑫, 泮晓华. 2010. 孕震断层的多锁固段脆性破裂机制与地震预测新方法的探索. 地球物理学报, 53(4): 1001~1014.

秦四清, 薛雷. 2011. 云南盈江 $M_s5.8$ 级地震和缅甸 $M_s7.2$ 级地震预测总结及震后趋势分析. 地球物理学进展, 26(2): 462~468.

秦四清, 薛雷, 李国梁, 泮晓华. 2012. 云南昭通“9·7 地震”的前瞻性预测验证. 地球物理学进展, 27(5): 1837~1840.

秦四清, 薛雷, 李国梁, 泮晓华. 2013. 甘肃岷县漳县 6.6 级地震的前瞻性预测验证及震后趋势分析. 地球物理学进展, 28(4): 1860~1868.

秦四清, 薛雷, 李国梁, 泮晓华, 李培. 2014a. 四川省芦山“4·20”7.0 级地震的前瞻性预测验证及震后趋势分析. 地球物理学进展, 29(1): 141~147.

秦四清, 薛雷, 李培, 李国梁. 2014b. 新疆于田 7.3 级地震前瞻性预测回顾及其震后趋势分析. 地球物理学报, 57(2): 679~684.

秦四清, 薛雷, 李培, 李国梁, 王苗苗. 2014c. 云南景谷 $M_s6.6$ 级地震前瞻性预测回顾及其震后趋势分析. 地球物理学进展, 29(5): 2479~2482.

秦四清, 李培, 薛雷, 李国梁. 2015a. 环太平洋地震带巨震预测. 地球物理学进展, 30(2): 0540~0558.

秦四清, 李培, 薛雷, 吴晓娟. 2015b. 欧亚地震带大震预测(I): 板间地震区. 地球物理学进展, 30(3): 1124~1140.

秦四清, 杨百存, 薛雷, 李培, 吴晓娟. 2015c. 台湾海峡地震区大震预测. 地球物理学进展, 30(5): 2013~2019.

秦四清, 李培, 杨百存, 薛雷, 吴晓娟. 2016a. 环太平洋、大洋海岭与大陆裂谷地震带主要地震区主震事件判识. 地球物理学进展, 31(2): 0574~0588.

秦四清, 杨百存, 吴晓娟, 薛雷, 李培. 2016b. 中国大陆某些地震区主震事件判识(II). 地球物理学进展, 31(1): 2517~2550.

秦四清, 杨百存, 薛雷, 李培, 吴晓娟. 2016c. 欧亚地震带主要地震区主震事件判识. 地球物理学进展, 31(2): 559~573.

秦四清, 杨百存, 薛雷, 李培, 吴晓娟. 2016d. 地震震级修订方法. 地球物理学进展, 31(3): 965~972.

任隽. 2012. 渭河盆地深部地壳结构探测与盆地构造研究. 导师: 彭建兵, 王夫运. 西安: 长安大学博士学位论文: 1~272.

任镇寰, 罗振暖. 1998. 华南地震区地震带划分的新研究. 华南地震, 18(2): 10~15.

沈军. 2014. 中国新疆及邻区地震构造图. 北京: 中国地质大学出版社.

宋治平, 张国民, 刘杰, 尹继尧, 薛艳, 宋先月. 2011. 全球地震目录. 北京: 地震出版社: 1~450.

唐新功, 尤双双, 胡文宝, 严良俊. 2012. 龙门山断裂带地壳密度结构. 地震地质, 34(1): 28~38.

万天丰. 2004. 侏罗纪地壳转动与中国东部岩石圈转型. 地质通报, 23(Z2): 147~153.

万天丰. 2012. 中国大陆岩石圈的形成、演化与特征. 自然杂志, 34(4): 196~200, 218.

王红霞, 郭玉贵. 2005. 黄海及邻区莫霍面起伏特征. 地球物理学进展, 20(2): 566~573.

王锺琦, 张荣祥, 汪敏, 罗锦添, 王建民. 1994. 地震区工程选址手册. 北京: 中国建筑工业出版社: 1~98.

吴晓娟, 秦四清, 薛雷, 杨百存, 李培, 张珂. 2016. 基于震例探讨大地震的物理机制. 地球物理学报, 59(10): 3696~3710.

许才军, 张朝玉, 姜卫平, 朱智勤, 贾剑钢, 温扬茂, 丁开华. 2009. 地壳形变测量与数据处理. 武汉: 武汉大学出版社: 1~194.

徐常芳. 1996. 中国大陆地壳上地幔电性结构及地震分布规律(一). 地震学报, 18(2): 254~261.

许志琴, 赵志兴, 杨经绥, 袁学诚, 姜枚. 2003. 板块下的构造及地幔动力学. 地质通报, 22(3): 49~159.

薛雷, 秦四清, 杨百存, 张珂, 陈泓然. 2018. 探讨与汶川地震有关的焦点科学问题. 科学技术与工程, 18(11): 1~15.

杨百存, 秦四清, 薛雷, 张珂. 2018. 2017 年伊拉克 M_w 7.3 地震的类型界定及其震后趋势分析. 地球物理学报, 61(2): 616~624.

杨百存. 2019. 锁固段加速破裂行为的物理自相似律. 导师: 秦四清. 北京: 中国科学院大学博士学位论文: 1~140.

杨百存, 秦四清, 薛雷, 陈泓然. 2020. 锁固段损伤过程中的能量转化与分配原理. 东北大学学报(自然科学版), 41(7): 975~981.

杨晓松, 马瑾, 张先进. 2003. 大陆壳内低速层成因综述. 地质科技情报, 22(2): 35~41.

于洋. 2016. 华北克拉通东部岩石圈大地电磁测深研究. 导师: 魏文博. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1~78.

袁一凡, 田启文. 2012. 工程地震学. 北京: 地震出版社: 1~358.

曾融生, 孙为国, 毛桐恩, 林中洋, 胡鸿翔, 陈光英. 1995. 中国大陆莫霍界面深度图. 地震学报, 17(3): 322~327.

张岭, 刘劲松, 郝天璁, 刘建华, 胥颐. 2007. 渤海湾盆地及其邻域地区地壳与上地幔层析成像. 中国科学: 地球科学, 37(11): 1444~1455.

张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学: 地球科学, 33(s1): 12~20.

张文佑, 叶洪, 钟嘉猷. 1978. “断块”与“板块”. 中国科学, 21(2): 195~211.

张文佑, 张抗, 赵永贵, 蔡新平, 王信和, 徐贵忠, 吴海威, 韩贝传, 曾湘山. 1983. 华北断块区中、新生代地质构造特征及岩石圈动力学模型. 地质学报, 57(1): 33~42.

张文佑. 1984. 断块构造导论. 北京: 石油工业出版社: 1~385.

张裕明, 汪良谋, 董瑞树, 国文秀, 王湘南. 1981. 亚欧地震构造图说明书. 北京: 地图出版社.

周真恒, 邓万明. 1998. 壳内多震层孕震环境研究进展. 地震地质, 20(4): 443~453.

朱介寿, 曹家敏, 李显贵, 周兵. 1997. 中国及其邻区地球三维结构初始模型的建立. 地球物理学报, 40(5): 627~648.

Artemieva I M, Thybo H. 2013. EUNaseis: A seismic model for Moho and crustal structure in Europe, Greenland, and the North Atlantic region. Tectonophysics, 609: 97~153.

Benioff H. 1951. Earthquakes and rock creep: (Part I: Creep characteristics of rocks and the origin of aftershocks). Bulletin of the Seismological Society of America, 41(1): 31~62.

Bhasker T. 2013. Overview of Independent Spent Fuel Storage Installations (ISFSIs) in the New Madrid Seismic Zone (NMSZ) and Wabash Valley Seismic Zone (WVSZ). 22nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology San Francisco, California, USA. August 18~23, Division IX~P409.

Bowman D D, Ouilleon G, Sammis C G, Sornette A, Sornette D. 2012. An observational test of the critical earthquake concept. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 103(B10): 24359~24372.

Brent G. 2017. An earthquake with a dozen faults. Science, 356(6334): 149~151.

Bufe C G, Varnes D J. 1993. Predictive modeling of the seismic cycle of the Greater San Francisco Bay Region. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 98(B6): 9871~9883.

Bus Z, Szeidovitz G, Vaccari F. 2000. Synthetic seismogram based deterministic seismic zoning for the Hungarian part of the Pannonian basin. Pure and Applied Geophysics, 157(1~2): 205~220.

Cao Xianzhi, Li Sanzhong, Liu Xin, Suo Yanhui, Zhao Shujuan, Xu Liqing, Dai Liming, Wang Pengcheng, Yu Shan. 2013&. The intraplate morphotectonic inversion along the Eastern Taihang Mountain Fault Zone, North China and its mechanism. Earth Science Frontiers, 20(4): 088~103.

Carlson J. 1989. Mechanical model of an earthquake fault. Physical Review A, 40(11): 6470~6484.

Chen Hongran, Qin Siqing, Xue Lei, Yang Baicun, Zhang Ke. 2019&. Modes of mechanical action between locked segments. Journal of Engineering Geology, 27(1): 1~13.

Chen Xiangjun, Shang Guan Wenming, Song Xiuqing. 2018&. Study on one dimensional crustal velocity model of Xinjiang area. China Earthquake Engineering Journal, 40(2): 294~304.

Cid J, Susagna T, Goula X, Chavarria L, Figueras S, Fleta J, Casas A, Roca A. 2001. Seismic zonation of Barcelona based on numerical simulation of site effects. Pure and Applied Geophysics, 158(12): 2559~2577.

Cornell C A. 1968. Engineering Seismic Risk Analysis. Bulletin of the seismological society of America, 58(5): 1583~1606.

Deng Qidong, Ran Yongkang, Yang Xiaoping, Min Wei, Chu Quanzhi. 2007#. Map of Active Tectonics in China(1:4000000). Beijing: Seismological Press.

Deng Qidong, Gao Xiang, Yang Hu. 2009#. Fault-block tectonics, active fault-block tectonics and earthquake activity. Chinese Journal of Geology, 44(4): 1083~1093.

Dong Jinlong, Hu Xiuju, Zou Changwei. 2015 #. Distribution characteristics of global Earthquakes, volcanoes and their changes in relationship. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 5: 87~90.

Fan Jingtian. 2002&. Experimental studies on plagioclase amphibolites of Kangding group and preliminary discussions on the formation cause of low velocity layers in the crust of Kang-Dian tectonic zone. Institute of geology. Tutor: Ma shengli, Liu liqiang, Yang xiaosong. Beijing: Master Dissertation, China Earthquake Administration; 1~60.

Fu Chengyi, Chen Yuntai, Chen Rong. 1979&. Researches on the physics of the earthquake foci. Chinese Journal of Geophysics, 22

- (4): 315~320.
- Grollimund B, Zoback M D. 2001. Did deglaciation trigger intraplate seismicity in the New Madrid Seismic Zone. *Geology*, 29(2): 175~178.
- Gu Zhijuan, Guo Caicai, Li Biao, Xiao Xiaohui, Zhang Zhaozhong, Zhou Zhaolin. 1995#. Preliminary study on the cause of formation of low velocity layer in the crust. *Science in China (Series B)*, 25(1): 108~112.
- Hamling I J, Hreinsdóttir S, Clark K, Elliott J, Liang C, Fielding E, Litchfield N, Villamor P, Wallace L, Wright T J, D'Anastasio E, Bannister S, Burbidge D, Denys P, Gentle P, Howarth J, Mueller C, Palmer N, Pearson C, Power W, Barnes P, Barrell D J A, Van Dissen R, Langridge R, Little T, Nicol A, Pettinga J, Rowland J, Stirling M. 2017. Complex multifault rupture during the 2016 M_w 7.8 Kaikōura earthquake, New Zealand. *Science*, 356(6334): 7194.
- Hao Tianyan, Hu Weijian, Xing Jian, Hu Litian, Xu Ya, Qin Jingxin, Liu Shaohua, Lei Shoumin. 2014#. The Moho depth map (1: 5000000) in the land and seas of China and adjacent areas and its geological implications. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(12): 3869~3883.
- Hong Hanjing, Chen Huixian, Zhao Yi, Hu Jiuchang. 2009#. Global earthquakes and volcanoes: Distribution and variations. *Seismology and Geology*, 31(4): 573~583.
- Hu Dezhaoh, Yun Lingling, Jiang Yongji, Wang Liangshu, Xu Mingjie. 1989#. On the low velocity layer and Conrad surface within the crust of southern parts of China. *Experimental petroleum geology*, 11(4): 331~340.
- Hu Weijian, Hao Tianran, Qin Jingxin, Li Zhiwei, Jiang Weiwei, Jiang Didi, Xing Jian, Hu Litian, Xu Ya, Lei Shoumin. 2014#. Moho depth and deep crustal structure in the land and seas of China and adjacent areas: An example of the Altay~Bashi Channel profile. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(12): 3932~3943.
- Huang Jiqing, Ren Jishun, Jiang Chunfa, Zhang Zhimeng, Xu Zhiqin. 1977#. An outline of the tectonic characteristics of China. *Acta Geologica Sinica*, (02): 117~135.
- Jin Xianglong, Gao Jinyao. 2001#. The satellite altimetry gravity field and the geodynamic feature in the west Pacific. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 21(1): 1~6.
- Jiao Yuyuan, Shen Xuzhang, Li Qiusheng. 2017#. Seismic evidence of the Conrad discontinuity on the northeast margin of the Tibetan Plateau and a tentative discussion on its tectonic implications. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(4): 469~478.
- Keilis-Borok V I, Soloviev A A. 2003. Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction. *Springer Series in Synergetics*.
- Kelson K I, Simpson G P, VanArsdale R B, Haraden C C, Lettis W R. 1996. Multiple late Holocene earthquakes along the Reelfoot fault, central New Madrid seismic zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101: 6151~6170.
- Kenner S J, Segall P. 2000. A mechanical model for intraplate earthquakes: Application to the New Madrid seismic zone. *Science*, 289: 2329~2332.
- Lay T. 2015. The surge of great earthquakes from 2004 to 2014. *Earth and Planetary Science Letters*, 409: 133~46.
- Le Pichon X. 1968. Sea-floor spreading and continental drift. *Journal of Geophysical Research*, 73(12): 3661~3697.
- Lei Qiyun, Chai Chizhang, Zheng Wenjun, Du Peng, Xie Xiaofeng, Wang Yin, Cui Jin, Meng guangkui. 2014#. Activity and slip rate of the northern section of yellow river fault revealed by drilling. *Seismology and Geology*, 36(2): 464~477.
- Li Songlin, Zhang Xiankang, Song Zhanlong, Shi Jinhu, Deng Hongzhao, Yang Jian, Zhang Chengke, Ren Qingfang. 2001#. Three-dimensional crustal structure of the capital area obtained by a joint inversion of dss data from multiple profiles, 44(03): 360~368+438.
- Li Tingdong, Geng Shufang, Yan Keming, Fan Benxian, Chen Bingwei. 1997#. Geological map of Asia and Europe. Beijing: Geological Publishing House.
- Li Zhiwei, Xu Yi, Hao Tiantan, Liu Jinsong, Zhang Ling. 2006#. Seismic tomography and velocity structure in the crust and upper mantle around Bohai Sea area. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(3): 797~804.
- Lu Yuanzhong, Chen Zhangli, Wang Biquan. 1985#. Earthquake prediction method of seismology. Beijing: Seismological Press: 1~268.
- Luo Wenxing, Li Dewei, Wang Xiaofeng. 2008#. Focal depth and mechanism of intraplate earthquakes in the Qinghai—Tibet Plateau. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(5): 618~626.
- Luo Yan, Chong Jiajun, Ni Sidao, Chen Qifu, Chen Yi. 2008#. Moho undulation and sedimentary thickness in the capital area. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(4): 1135~1145.
- Lü Zuoyong, Wu Jianping. 2010#. 3-D P wave velocity structure of crust and upper mantle beneath North China. *Acta Seismologica Sinica*, 32(1): 1~11.
- Magsi H Z. 2014. Seismic zoning of Pakistan. *New Concepts in Global Tectonics Journal*, 2: 47~53.
- Ma Jin. 1999#. Changing viewpoint from fault to block—a discussion about the role of active block in seismicity. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 173~180.
- Markušić S, Herak M. 1998. Seismic zoning of Croatia. *Natural Hazards*, 18(3): 269~285.
- Mason B. 2017. New Zealand temblor points to threat of compound quakes. *Science*, 355: 1250~1251.
- Meissner R, Werer T, Fluck E R. 1987. The Moho in Europe—implication for crustal development. *Annales Geophysicae*, 87(04B): 357~364.
- McKenzie D P, Parker R L. 1967. The North Pacific: An example of tectonics on a sphere. *Nature*, 216: 1276~1280.
- Miao Peishi. 2010#. Global tectonic system. Beijing: Seismological Press.
- Mooney W D, Braille L. 1989. The seismic structure of the continental crust and upper mantle of North America. *The Geology of North America*, A(4): 39~52.
- Morgan W J. 1968. Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. *Journal of Geophysical Research*, 73(6): 1959~1982.
- Muço B, Vaccari F, Panza G, Kuka N. 2002. Seismic zonation in Albania using a deterministic approach. *Tectonophysics*, 344(3~4): 277~288.
- Nishenko S P, Jacob K H. 1990. Seismic potential of the Queen Charlotte—Alaska—Aleutian Seismic Zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B3): 2511~2532.
- Nishenko S P. 1991. Circum-Pacific Seismic Potential: 1989~1999. *Pure and Applied Geophysics*, 135(2): 169~259.
- Papazachos B C, Papazachos C B. 2000. Accelerated preshock deformation of broad regions in the Aegean area. *Pure and Applied Geophysics*, 157(10): 1663~1681.
- Papazachos C B, Papazachos B C. 2001. Precursory accelerating Benioff in the Aegean area. *Annals of Geophysics*, 44: 461~474.

- Peng Keyin, Yin Xiangchu, He Rui. 2003#. Accelerating strain release and earthquake genesis scaling exponents from critical point hypothesis. *Earthquake Research in China*, 19(4): 425~430.
- Qin Baoyan. 1999#. A review of the study of the relationship between earthquake depths and earthquake causes. Editor: Chen Yuntai. The 20th anniversary of the founding of the Chinese Seismological Society. Beijing: Seismological Press; 1~538.
- Qin Siqing, Xu Xiwei, Hu Ping, Wang Yuanyuan, Huang Xin, Pan Xiaohua. 2010#. Brittle failure mechanism of multiple locked patches in a seismogenic fault system and exploration on a new way for earthquake prediction. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(4): 1001~1014.
- Qin Siqing, Xue Lei. 2011#. A summary of prediction for the Yingjiang $M_s5.8$ earthquake in Yunnan and the Burma $M_s7.2$ earthquake as well as the analysis on the earthquake situation after the earthquake. *Progress in Geophysics*, 26(2): 462~468.
- Qin Siqing, Xue Lei, Li Guoliang, Pan Xiaohua. 2012#. The verification of prospective prediction for the Zhaotong earthquakes on 7 September 2012. *Progress in Geophysics*, 27(5): 1837~1840.
- Qin Siqing, Xue Lei, Li Guoliang, Pan Xiaohua. 2013#. The verification of prospective prediction for the Minxian—Zhangxian $M_s6.6$ earthquake in Gansu province and an analysis on the future earthquake situation. *Progress in Geophysics*, 28(4): 1860~1868.
- Qin Siqing, Xue Lei, Li Guoliang, Pan Xiaohua, Li Pei. 2014a#. The verification of prospective prediction for the Lushan $M_s7.0$ earthquake on 20 April 2013 and an analysis on future earthquake situation. *Progress in Geophysics*, 29(1): 141~147.
- Qin Siqing, Xue Lei, Li Pei, Li Guoliang. 2014b#. A review of prospective prediction for the Yutian 7.3 earthquake in Xinjiang province and an analysis on future earthquake situation. *Progress in Geophysics*, 57(2): 679~684.
- Qin Siqing, Xue Lei, Li Pei, Li Guoliang, Wang Miao. 2014c#. A review of prospective prediction for the Jinggu $M_s6.6$ earthquake in Yunnan province and an analysis on future earthquake situation. *Progress in Geophysics*, 29(5): 2479~2482.
- Qin Siqing, Li Pei, Xue Lei, Li Guoliang. 2015a#. A prospective prediction of great earthquakes for the Circum-Pacific seismic belt. *Progress in Geophysics*, 30(2): 0540~0558.
- Qin Siqing, Li Pei, Xue Lei, Wu Xiaowa. 2015b#. A prospective prediction of major earthquakes for the Eurasian seismic belt (I): Interplate seismogenic zones. *Progress in Geophysics*, 30(3): 1124~1140.
- Qin Siqing, Yang Baicun, Xue Lei, Li Pei, Wu Xiaowa. 2015c#. Prospective prediction of major earthquakes for the Taiwan Strait seismic zone. *Progress in Geophysics*, 30(5): 2013~2019.
- Qin Siqing, Li Pei, Yang Baicun, Xue Lei, Wu Xiaowa. 2016a#. The identification of mainshock events for main seismic zones in seismic belts of the Circum-Pacific, ocean ridge and continental rift. *Progress in Geophysics*, 31(2): 0574~0588.
- Qin Siqing, Yang Baicun, Wu Xiaowa, Xue Lei, Li Pei. 2016b#. The identification of mainshock events for some seismic zones in mainland China (II). *Progress in Geophysics*, 31(1): 2517~2550.
- Qin Siqing, Yang Baicun, Xue Lei, Li Pei, Wu Xiaowa. 2016c#. The identification of mainshock events for main seismic zones in the Eurasian seismic belt. *Progress in Geophysics*, 31(2): 559~573.
- Qin Siqing, Yang Baicun, Xue Lei, Li Pei, Wu Xiaowa. 2016d#. Revision method of earthquake magnitude. *Progress in Geophysics*, 31(3): 965~972.
- Reguzzoni M, Sampietro D, Sanso F. 2013. Global Moho from the combination of the CRUST2.0 model and GOCE data. *Geophysical Journal International*, 195(1): 222~237.
- Ren Jun. 2012#. Probe on the deep crustal structure in Weihe basin and tectonics research of basin. Tutor: Peng Jianbing, Wang Fuyun. Xi'an: Doctoral Dissertation, Chang'an University; 1~272.
- Ren Zhenhuan, Luo Zhenhuan. 1998#. A new study on the division of seismic zones in south China seismic area. *South China of Seismology*, 18(2): 10~15.
- Scordilis E M, Papazachos C B, Karakaisis G F, Karakostas V G. 2004. Accelerating seismic crustal deformation before strong mainshocks in Adriatic and its importance for earthquake prediction. *Journal of Seismology*, 8(1): 57~70.
- Shen Jun. 2014#. Seismotectonic map of Xinjiang and its adjacent areas. Beijing: China University of Geosciences Press.
- Song Zhiping, Zhang Guomin, Liu Jie, Yin Jiyao, Xue Yan, Song Xianye. 2011#. Global Earthquake Catalog. Beijing: Seismological Press; 1~450.
- Stern R J. 2002. Subduction zones. *Reviews of Geophysics*, 40: 3-1~3-38.
- Tang Xingong, You Shuangshuang, Hu Wenbao, Yan Liangjun. 2012#. The crustal density structure underneath Longmenshan fault zone. *Seismology and Geology*, 34(1): 28~38.
- Tuttle M P, Schweig E S, Sims J D, Lafferty R H, Wolf L W, Haynes M L. 2002. The earthquake potential of the New Madrid seismic zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(6): 2080~2089.
- Wan Tianfeng. 2004#. Rotation and Jurassic crust and transformation of the lithosphere in eastern China. *Geological Bulletin of China*, 23(Z2): 147~153.
- Wan Tianfeng. 2012#. Formation, evolution and characteristics of the China continental lithosphere. *Chinese Journal of Nature*, 34(4): 196~200, 218.
- Wang Hongxia, Guo Yugui. 2005#. The Study on the fluctuation of Moho in Yellow Sea and its adjacent areas. *Progress in Geophysics*, 20(2): 566~573.
- Wang Zhongqi, Zhang Rongxiang, Wang Min, Luo Jintian, Wang Jianmin. 1994#. Handbook of engineering site selection in earthquake areas. Beijing: China Construction Industry Press; 1~98.
- Wilson J T. 1965. A new class of faults and their bearing on continental drift. *Nature*, 207: 343~347.
- Wu Xiaowa, Qin Siqing, Xue Lei, Yang Baicun, Li Pei, Zhang Ke. 2016#. Physical mechanism of major earthquakes based on earthquake cases. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(10): 3696~3710.
- Xu Caijun, Zhang Chaoyu, Jiang Weiping, Zhu Zhiqin, Jia Jiangang, Wen Yangmao, Ding Kaihua. 2009#. Crustal deformation measurement and data processing. Wuhan: Wuhan University Press; 1~194.
- Xu Changfang. 1996#. Electrical structure and distribution of the crust and upper mantle in the Chinese mainland (I). *Acta seismologica sinica*, 18(2): 254~261.
- Xu Zhiqin, Zhao Zhixing, Yang Jingsui, Yuan Xuecheng, Jiang Mei. 2003#. Tectonics beneath plate and mantle dynamics. *Geological bulletin of China*, 22(3): 49~159.
- Xue Lei, Qin Siqing, Yang Baicun, Zhang Ke, Chen Hongran. 2018#. Discussion on key scientific issues related to the Wenchuan earthquake. *Science technology and engineering*, 18(11): 1~15.
- Yang Baicun, Qin Siqing, Xue Lei, Zhang Ke. 2018#. Identification of seismic type of 2017 Iraq $M_W7.3$ earthquake and analysis of its post-

- quake trend. Chinese Journal of Geophysics, 61(2): 616~624.
- Yang Baicun. 2019#. A physical self-similarity law describing the accelerating failure behavior of locked segments. Tutor: Qin Siqing. Beijing: Doctoral Dissertation, University of Chinese Academy of Sciences; 1~140.
- Yang Baicun, Qin Siqing, Xue Lei, Chen Hongran. 2020#. Energy conversion and allocation principle during the damage process of locked segment. Journal of Northeastern University Natural Science, 41(7): 975~981.
- Yang Xiaosong, Ma Jin, Zhang Xianjin. 2003#. Summarization of genesis of low-velocity layer in continental crust. Geological science and technology information, 22(2): 35~41.
- Yeats R. 2012. Active faults of the world, Cambridge University Press.
- Yu Yang. 2016#. MT research of lithosphere in the eastern North China Craton. Tutor: Wei Wenbo. Beijing: Master Dissertation, China University of Geosciences(Beijing); 1~78.
- Yuan Yifan, Tian Qiwen. 2012#. Engineering seismology. Beijing: Seismological Press; 1~358.
- Zeng Rongsheng, Sun Weiguo, Mao Tongen, Lin Zhongyang, Hu Hongxiang, Chen Guangying. 1995#. Moho depth map of Chinese mainland. Acta seismologica sinica, 17(3): 322~327.
- Zhang Ling, Liu Jinsong, Hao Tiantan, Liu Jianhua, Xu Yi. 2007#. Tomography of crust and upper mantle in Bohai Bay basin and its adjacent areas. Scientia Sinica Terrae, 37(11): 1444~1455.
- Zhang Peizhen, Deng Qidong, Zhang Guomin, Ma Jin, Gan Weijun, Min Wei, Mao Fengying, Wang Qi. 2003#. Chinese mainland strong earthquake activity and active blocks. Scientia Sinica Terrae, 33(S1): 12~20.
- Zhang Wenyong, Ye Hong, Zhong Jiayou. 1978#. "Fault block" and "plate". Scientia Sinica, 21(2): 195~211.
- Zhang Wenyong, Zhang Kang, Zhao Yonggui, Cai Xinping, Wang Xinhe, Xu Guizhong, Wu Haiwei, Han Beichuan, Zeng Xiangshan. 1983#. The Mesozoic and Cenozoic geotectonic characteristics and dynamic model of the lithosphere in North China fault block region. Acta Geologica Sinica, 57(1): 33~42.
- Zhang Wenyong. 1984#. Introduction to crustal fault block. Beijing: Petroleum Industry Press; 1~385.
- Zhang Yuming, Wang Liangmou, Dong Ruishu, Guo Wenxiu, Wang Xiangnan. 1981#. Description of aseismic tectonic map. Beijing: Cartographic Publishing House.
- Zhou Zhenheng, Deng Wanming. 1998#. Advances of research on the intracrustal seismogenic. Seismology and geology, 20(4): 443~453.
- Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Li Xiangui, Zhou Bing. 1997#. The reconstruction of preliminary three-dimensional earth's model and its implications in China and adjacent regions. Chinese Journal of Geophysics, 40(5): 627~648.

Partition method of seismogenic tectonic block and its corresponding seismic zone

WU Xiaowa¹⁾, QIN Siqing^{2,3,4)}, XUE Lei^{2,3)}, ZHANG Ke^{2,3,4)}, CHEN Hongran^{2,3)}, ZHAI Mengyang^{2,3,4)}

1) BGI Engineering Consultants LTD, Beijing, 100038;

2) Key Laboratory of Shale Gas and Geoenvironment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029;

3) Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029;

4) College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049

Abstract: The reliable partition of seismic zones is very important for earthquake prediction and seismic hazard evaluation. We have recognized that an intraplate seismogenic tectonic block is laterally bounded by major faults, or by major faults and plate boundaries, and its bottom boundary is the Conrad discontinuity or the low-velocity and high-conductivity layer; an interplate seismogenic tectonic block, a subducting plate, is constrained by major faults and/or plate boundaries; the earthquakes within the same seismogenic tectonic block and the same seismic period are intrinsically linked. Thus, a seismic zone can be defined as an area representing the seismicity generated from the locked segment's cracking within the corresponding seismogenic tectonic block. Based on the principle of determining the boundaries of a seismogenic tectonic block and its corresponding seismic zone we propose, the two major seismic belts worldwide, the Circum-Pacific seismic belt and the Eurasia seismic belt, are divided into 62 seismic zones; the partition scheme of each seismic zone has passed the test of the brittle failure theory of multiple locked segments, which shows that the scheme is reliable. Furthermore, we summarize the seismic zoning method.

Keywords: seismogenic tectonic block; seismic zoning; major fault; plate boundary; locked segment

Acknowledgements: This study was supported by the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP) (No. 2019QZKK0904) and the National Key Research and Development Project of China (No. 2019YFC1509701)

First author: WU Xiaowa, female, born in 1985, Ph. D. , mainly engaged in engineering geology and rock failure mechanism research; Email: xiaowabj@163.com

Corresponding author: QIN Siqing, male, born in 1964, professor, mainly engaged in engineering geology, nonlinear rock and soil mechanics and geotechnical engineering research; his current scientific interest is in the physical prediction of major earthquakes; Email: qsqhope@mail.iggcas.ac.cn

Manuscript received on: 2020-05-03; **Accepted** on: 2020-12-09; **Network published** on: 2021-02-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 02. 004 **Edited by:** LIU Zhiqiang

中国地质学会 2020 年度“十大地质科技进展”

(按项目第一完成人姓名或第一完成单位名汉语拼音字母顺序排列)

大庆油田等:松辽盆地北部古龙页岩油勘探取得重大发现

大庆油田在松辽盆地北部古龙凹陷青一段地层的纯页岩内实现水平井产量重大战略突破,试油获高产工业油气流,定产试采表现出稳定的高产能力,平面上 15 口直井试油证实古龙页岩油平面分布范围广,规模立体含油,轻质油带具有较好的产油能力,轻质油带页岩油气资源量达到几十亿吨。通过岩心精细描述及实验分析化验数据,建立了以古沉积环境控制原始优质烃源岩发育、适中的热演化程度控制油气富集、成岩作用控制优质储层分布的“三控”页岩油富集地质理论,形成了四项“颠覆性”突破认识,系统建立了我国陆相淡水湖盆纯页岩型页岩油气富集理论,创新形成了纯页岩型储层大规模体积复合压裂技术体系。

樊隽轩等:大数据重现地球 3 亿多年生物多样性变化历史

地球上曾经生活过的生物 99% 以上已经灭绝,通过化石记录重建地球生物多样性变化历史是认识当今生物多样性现状与未来趋势的重要途径。南京大学、中国科学院南京地质古生物研究所樊隽轩、沈树忠团队联合国内外专家建设国际大型数据库,自主研发人工智能算法,利用“天河二号”超算取得突破,获得了全球第一条高精度古生代 3 亿多年的海洋生物多样性变化曲线,其时间分辨率较国际同类研究提高 400 倍。新曲线精准刻画出地球生物多样性演变过程中的多次重大生物灭绝、复苏和辐射事件,揭示了当时生物多样性变化与大气 CO₂ 含量以及全球性气候剧变的协同关系。

蒋向明等:煤矿老窑采空区范围及积水情况精细探查关键技术实现新突破

由以中国煤炭地质总局水文地质局蒋向明、许超、马瑞花、关民全为骨干的研究团队,针对老窑透水事故占煤矿水害事故 80% 的严峻现状,对我国 14 个煤炭基地采空区现状进行了系统研究、科学分类,揭示了采空区的宏观规律;确立了老窑采空区精细探测框架体系,揭示了集成应用多种方法综合勘探的思路是探测老窑采空区及积水的有效途径,成功攻克了制约老窑采空区探测技术应用的关键技术瓶颈。煤矿老窑采空区范围及积水情况精细探查关键技术得到了实践检验,成效显著,可以有效预防老窑透水事故的发生,全面推动了煤炭采空区探测领域技术应用的发展。该成果对国内煤矿老窑采空区范围及积水情况探查具有引领示范作用。

矿产资源研究所等:大陆碰撞成矿理论指导成功实施青藏高原首个 3000 m 固体矿产科学深钻并揭露巨厚铜金矿体

由中国地质调查局矿产资源研究所、西藏华泰龙矿业开发有限公司等单位组成的科研团队,在大陆碰撞成矿作用理论的指导下,在青藏高原原甲玛矿区成功实施了固体矿产首个 3000 m 科学深钻,精细揭示了斑岩成矿系统结构,实现地质信息“透明化”,累计揭示 584.36 m 铜钼(金、银)矿体,建立了完备的高原科学深钻施工工艺,也为构建 3000 m 以浅的资源勘查和预测技术方法奠定了坚实基础。创建了斑岩成矿系统“多中心复合”成矿作用模型,丰富和完善了碰撞造山成矿理论,并依此新发现则古朗北矿段的巨厚斑岩和矽卡岩矿体,在矿区深部及外围取得重大找矿突破,对国内外深地资源勘查和探测技术集成具有引领示范作用。

李海兵等:新发现和厘定鲜水河木格措南全新世活动断层与色拉哈挤压阶区并有效服务重大工程规划论证

由以中国地质调查局地质研究所李海兵为首的科研团队,通过组织实施巴颜喀拉地块周缘大型断裂带区域地质调查等项目,确定了鲜水河断裂带折多山地区多条分支断裂的精细几何展布、构造变形特征、晚第四纪以来活动速率及地震危险性。在折多山花岗岩体内部首次发现全新世活动断裂带“木格措南断裂”,精确厘定出具有高地应力潜在超强破坏力的色拉哈断裂挤压阶区。根据上述研究成果为重大工程建设提供建议,有效服务了重大工程建设。

李子颖等:我国在诸广地区 1550 m 深度发现最深工业铀矿

以核工业北京地质研究院李子颖为首席专家的科研团队,建立了热液型铀矿深部地质结构三维探测技术和预测评价模型,在综合研究和探测的基础上,遴选了广东诸广南长江钻探场址。经设计和实施长江 1 号(GUSD-1)科学深钻,终孔深度 1709 m,取得铀矿找矿和技术重大突破,发现铀异常厚度大于 230.4 m,矿化累计厚度 51 m,工业铀矿段有 8 层,在 1550 m 深度发现我国目前最深的工业铀矿,刷新了我国近 70 年来铀矿找矿深度最深记录,将我国热液铀矿找矿深度向深部推进了 500 余米;进一步验证了热点深源铀成矿理论,提高了技术探测深度和精度。(下转第 366 页)