第34卷 第2期 地球物理学报 Vol. 34, No. 2
1991年3月 ACTA GEOPHYSICA SINICA Mar., 1991

阿德朗达克—西魁北克地震带地壳三维速度结构成像*

朱介寿[1)] K.-Y. Chun[2)] 骆 循[1)]
G. F. West[2)] R. Kokoski[2)]

摘 要

根据在阿德朗达克—西魁北克地震带及其邻近地区的59台短周期数字地震仪记录的直达P波走时观测值，用地震层析成像方法反演了该地区地壳三维速度结构. 结果表明，地壳上层（0—5km）在阿德朗达克穹隆山的中南部地区出现正速度异常；第二层（5—10km）及第三层（10—15km）的速度横向变化较小，介质相对比较均匀；第四层（15—25km）出现显著的速度异常，一个是位于地震带中部的正速度异常（+4%），它与布格重力正异常一致；另一个是位于阿德朗达克穹隆山下的负速度异常（−4%）. 结合已有的地质及地球物理资料进行对比，可以认为阿德朗达克是一个正在发展的穹隆上升山，但其热源前锋尚未到达地面的大陆热点.

关键词 阿德朗达克—西魁北克地震带，地震层析成像，地震活动性，大陆热点.

一、引 言

从美国纽约州北部到加拿大魁北克省西部，一条沿NNW—SSE向伸展的阿德朗达克—西魁北克地震带，是北美洲东部前寒武纪地盾的一个著名的板内地震活动区. 历史上，这个地震带上发生的强烈地震以有感面积大而著称（这些强震的地点及时间为 La Malbaie, 1925; Timiskaming, 1935; Cornwall, 1944）[1-4]. 然而，该带的地震分布与地表构造走向并不一致.

近年来，已有许多文章讨论了该地震带的地震构造特征，Sbar 及 Sykes[2] 报道了该地震带及邻近地区能很好定位的震源深度为从地表到25km深. Yang 及 Aggarwal[4] 给出了更详细的震源资料，在阿德朗达克穹隆山震源深度一般小于5km，在此穹隆山的西北地区，震源深度可达18km. 沿魁北克北东方向的圣劳伦斯河，震源深度达20km[5]. Forsyth[6] 用多种地球物理资料进行对比，指出该带地震活动性与地形、地磁及重力异常有一定的联系，并对地震分布提出了地质构造的解释. Hasegawa[7] 等讨论了该地区的地壳应力分布状态，并指出由下地壳的流变蠕动到上地壳的脆性破裂以地震形式释放能量的过程. Wahlstrom[8] 对阿德朗达克—西魁北克地震带的30个地震作了震源机制解，发

* 地震科学联合基金资助的课题.
1) 成都地质学院，成都 610059.
2) 加拿大多伦多大学.
本文1988年11月28日收到，1990年5月25日收到修改稿.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

现主压应力除少数异常外，一般都沿北东方向，即与北北西走向的地震带基本垂直。

自 1970 年以来，加拿大及美国分别在这一地区建立了高灵敏度的数字地震仪台网。其中，包括由加拿大地质调查局建立的全国标准台网及东部遥测台网，美国拉蒙特-多尔蒂地质调查所建立的纽约州地震台阵。利用这些高质量的地震资料，使我们能对震源进行精确定位及研究地壳结构。

本文利用上述地震台网记录的地方震直达 P 波走时数据，对阿德朗达克—西魁北克地震带地壳三维速度结构进行成像，以研究该区地壳深部结构特征，及与地震活动性和地质构造地球物理场的联系，特别是讨论了阿德朗达克穹隆山形成及演化的原因。

二、数据采集

研究区域位于北纬 43°—47°，西经 71°—78°，其地震活动如图 1 所示。

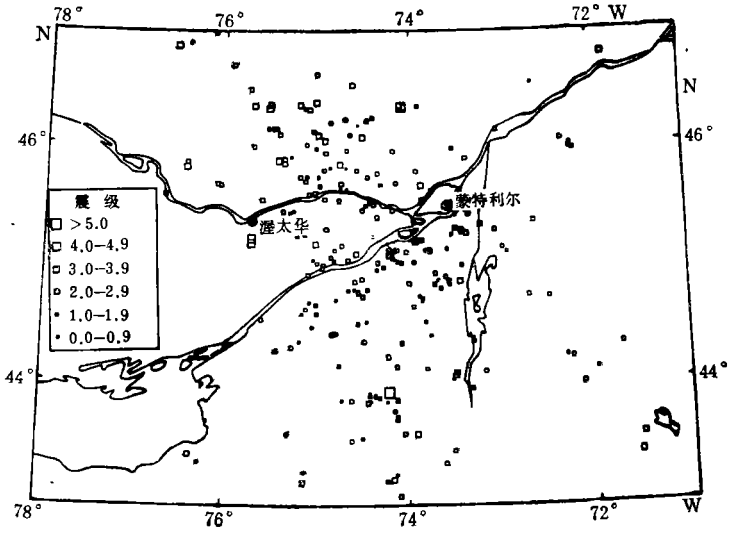

图 1 阿德朗达克—西魁北克地震带 1978—1987 年的地震活动

图 2 为该区的主要地质构造单元，它包括前寒武纪的格林威尔构造带、阿德朗达克穹隆山，以及圣劳伦斯地台、阿帕拉契亚褶皱带。格林威尔构造带又分为三部分，即安大略片麻岩带、中央变质沉积岩带及中央麻粒岩地体。阿德朗达克穹隆山是地盾上的异常隆起带，它在新生代显示出相当高的上升率。圣劳伦斯地台为古生代沉积岩覆盖的前寒武纪基底。

在研究区域内一共有 59 个短周期数字地震仪，每一台阵中地震仪接收的信号都传输到中心记录点按统一授时记录。一般震相识别的时间的分辨率可达 0.01—0.02s。

1978—1987 年，在研究区域内记录到 0.4—5.1 级（M_b）300 余次地震，在重新定位及反演地壳速度结构时，我们仅采用震中距小于 150km 的直达 P 波到时数据，以保证初至震相的准确辨认和精确读数。按上述标准，从 300 余次地震中挑选出 171 次地震。对这

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

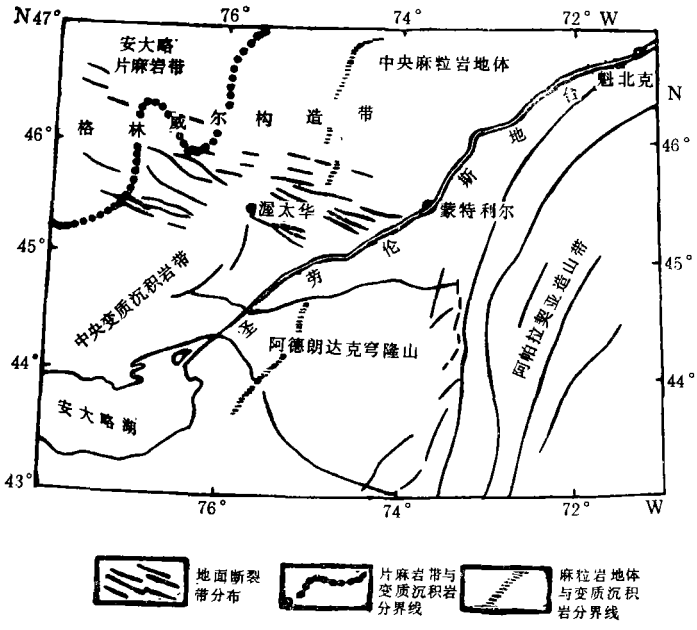

图 2　阿德朗达克—西魁北克地震带及其邻近地区的构造单元划分

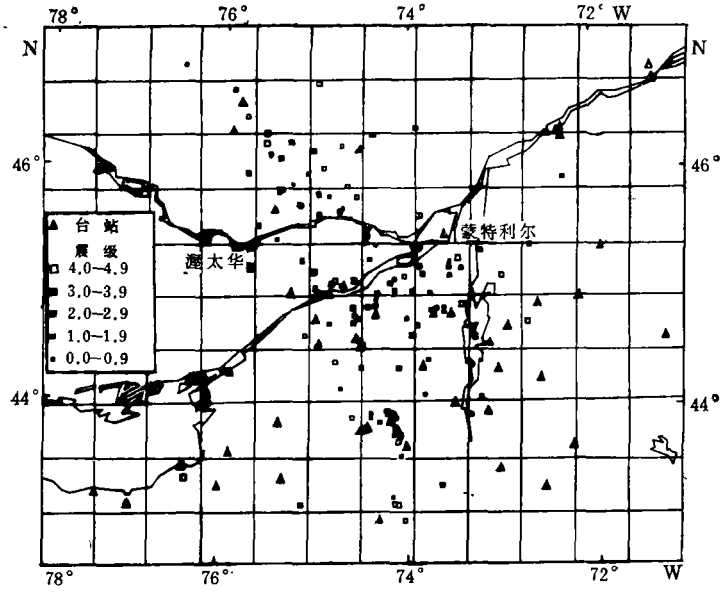

图 3　挑选出的用于反演的 171 次地震及台站分布，以及进行反演时块体沿水平方向的网格划分

些地震重新定位，震中距误差不大于 ±1km，震源深度误差分别为 0—±2km（50 次）及 ±2—±5km(121 次)。挑选出的地震及台站分布如图 3 所示。

在进行震源定位及三维速度反演时，必须确定参考模型。这一区域已先后有许多人对速度结构进行过研究，Yang 及 Aggarwal[4] 给出了纽约州北部及阿德朗达克的地壳

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

速度模型(图 4 中实线所示); Mereu[9] 等人利用地震折射剖面得出了格林威尔构造带的地壳速度模型,以后又由 Mohajor 修定为魁北克西部地区(短折线所示)及安大略地区(点线所示)两个地壳模型.

综合上述资料,我们用以下线性关系式表示阿德朗达克一西魁北克地震带的参数速度模型(用粗实线所示):

$$v(z) = 6.20 + 0.0203z, \tag{1}$$

式中 v 为纵波速度(单位 km/s), z 为深度(单位 km), 6.20 为地壳表层速度值, 0.0203 为垂直速度梯度值.

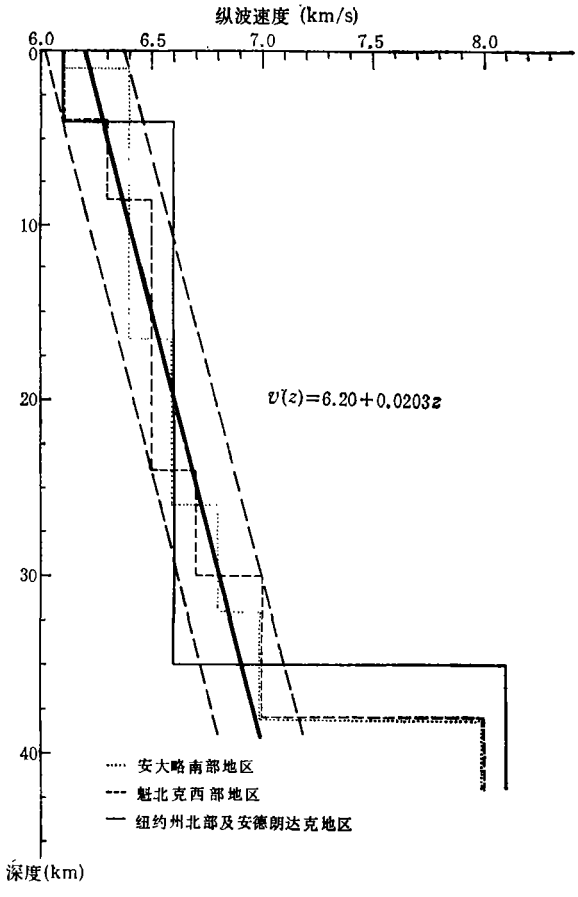

图 4 阿德朗达克一西魁北克地震带的参考速度模型
粗实线为纵向速度变化,虚线表示速度变化范围.

三、反 演 方 法

利用天然地震走时研究区域性地壳及上地幔的三维速度结构,过去一般用 Aki 等人[10,11]的方法计算. 地震波层析成像技术的发展,代数重建法(ART)的广泛应用,使大

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

规模数据处理及对地下介质的三维成像成为可能[12-17]。Nakanishi 比较了 ART 方法与 Aki 方法的优点与缺点[18]。McMechan 讨论了 ART 的特点、收敛性及分辨率等问题[16]。用 ART 方法反演地壳三维速度的细节可参考文献[19]，下面叙述该方法的原理。

设 $v_0(z)$ 为初始速度模型，将所研究的地壳范围沿纵横向分割为许多规则块体，每一块体的参数可用慢度表示。由于参考慢度 $s_0=1/v_0$，故慢度扰动为

$$\Delta s=-\frac{\Delta v}{v_0^2}, \tag{2}$$

第 i 个震源到第 j 个台站的直达 P 波走时残差为

$$\Delta t_{ij}=\int_{\Gamma_{ij}}\Delta s dl+\left(\frac{\partial t_{ij}}{\partial x}\right)\Delta x_i+\left(\frac{\partial t_{ij}}{\partial y}\right)\Delta y_i+\left(\frac{\partial t_{ij}}{\partial z}\right)\Delta z_i+\Delta t_i+e_{ij}, \tag{3}$$

式中 Γ_{ij} 为地震射线路径，Δx_i、Δy_i、Δz_i 及 Δt_i 为震源位置及走时的改正值，e_{ij} 是包括观测误差及微分高阶项误差的项，$\frac{\partial t_{ij}}{\partial x}$、$\frac{\partial t_{ij}}{\partial y}$、$\frac{\partial t_{ij}}{\partial z}$ 为走时对 x、y、z 的偏导数。

设每一块体中慢度扰动为常数，则(3)式中的第一项可以写为

$$\int_{\Gamma_{ij}}\Delta s dl=\sum_{k=1}^{K}l_{ijk}\Delta s_k, \tag{4}$$

式中 Δs_k 为第 k 块介质的慢度扰动，l_{ijk} 为从第 i 个震源到第 j 个台站地震射线通过第 k 块的长度段。于是(3)式可写为

$$\Delta t_{ij}=\sum_{k=1}^{K}l_{ijk}\Delta s_k+\left(\frac{\partial t_{ij}}{\partial x}\right)\Delta x_i+\left(\frac{\partial t_{ij}}{\partial y}\right)\Delta y_i+\left(\frac{\partial t_{ij}}{\partial z}\right)\Delta z_i+\Delta t_i+e_{ij}, \tag{5}$$

在(5)式中，射线在各块体通过的各项偏导数及曲线段长 l_{ijk} 可由以下公式计算。

考虑速度分布仅沿垂直方向增加的情况：$v(z)=c+\beta z$，作适当的坐标变换，地震波走时方程可以写为

$$t_{ij}=\frac{1}{\beta}\ln\frac{v(z_i)(1+\sqrt{1-p_{ij}c^2})}{c(1+\sqrt{1-p_{ij}^2v^2(z_i)})}+\alpha_1\frac{2}{\beta}\ln\frac{1+\sqrt{1-p_{ij}^2v^2(z_i)}}{p_{ij}v(z_i)}, \tag{6}$$

$$x_{ij}=\frac{1}{p_{ij}\beta}\left(\sqrt{1-p_{ij}^2c^2}+\alpha_2\sqrt{1-p_{ij}^2v^2(z_i)}\right), \tag{7}$$

其中，p_{ij} 为射线参数，可由(7)式解出；并有

$$\alpha_1=\begin{cases}1, & 当\ x_{ij}>\frac{1}{p_{ij}\beta}\sqrt{1-p_{ij}^2c^2}\\ 0, & 当\ x_{ij}\leqslant\frac{1}{p_{ij}\beta}\sqrt{1-p_{ij}c^2},\end{cases}$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\alpha_2 = 2\alpha_1 - 1.$$

各项偏导数计算公式为

$$\frac{\partial t_{ij}}{\partial x} = w p_{ij} \cos \alpha,$$

$$\frac{\partial t_{ij}}{\partial y} = w p_{ij} \sin \alpha, \tag{8}$$

$$\frac{\partial t_{ij}}{\partial z} = -\frac{\alpha_2}{v(z_i)} [1 - p_{ij}^2 v^2(z_i)]^{1/2}.$$

式中

$$w = \begin{cases} -1, & 当\ x_j \geqslant x_i\ 且\ y_j < y_i, \\ 1, & 当\ x_j \leqslant x_i\ 且\ y_j > y_i, \end{cases}$$

$$\alpha = \arctan \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}.$$

地震射线在块体内的长度计算公式为

$$l_{ijk} = \frac{\theta}{180} \frac{1}{p_{ij}\beta}, \tag{9}$$

式中 θ 为射线通过第 k 块体的角度增量.

由(5)式根据走时残差 Δt_{ij} 不仅可以反演每一块体的慢度扰动值,而且能反演震源位置的改正值. 本方法将地下介质的速度结构及震源位置进行同时反演,(5)式简化后可以写为下列矩阵形式

$$\mathbf{A}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{\delta t} \tag{10}$$

式中 $\mathbf{A}$ 为 l_{ijk} 及各走时偏导数项组成的矩阵,它一般为具有大量零元素的稀疏矩阵; $\boldsymbol{x}$ 为包括待求的慢度扰动及震源位置改正值在内的向量; $\boldsymbol{\delta t}$ 为走时残差向量.

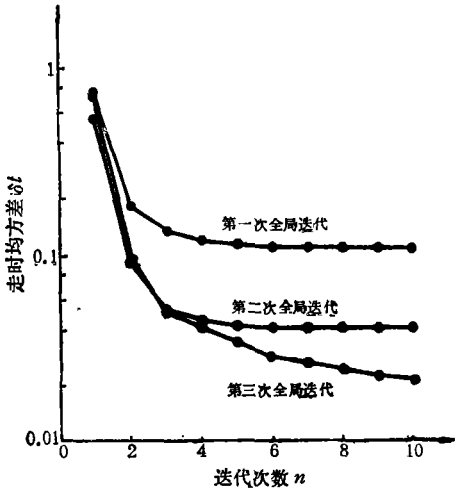

图 5 ART 算法迭代过程的收敛性

ART 是一种迭代方法,将对每一条射线进行反演计算. 设 $x^{(0)}$ 为初始模型(包括慢度扰动及震源位置改正值的初始值),则第 $n+1$ 次迭代结果可按下式计算

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} + \lambda \frac{\delta t_i - \langle a_i, x^{(n)} \rangle}{\langle a_i, a_i^{\mathrm{T}} \rangle} a_i^{\mathrm{T}},$$

式中 λ 为保证算法稳定性的阻尼因子, a_i 为矩阵 $\mathbf{A}$ 中的第 i 行元素. 对于全部地震事件产生的射线都进行一次反演,分别对各块体慢度及震源位置进行一次修定,称为一次子迭代;经过若干次子迭代,对速度模型及震源位置同时进行一次总体修正,称为全局迭代;每次全局迭代结束后,所得到新的慢度分布及震源位置,将作为下一次全局迭代的初值. 在本次计算中,各震源位置最后修正值的误差为: 震中距≤±1km, 震源深度≤±3km.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

经过严格挑选后，研究地区一共获得 1271 个直达 P 波到时观测值，对深达 25km 的地壳纵向按 0—5km，5—10km，10—15km，15—25km 的间隔分层，横向按 50 × 50km² 的面积分块（参见图 3）．在 500 × 450 × 25km³ 的体积内共获得 480 个块体．初始速度模型采用(1)式结果．反演过程的收敛性如图 5 所示，可见经过三次全局迭代后（每一全局迭代又进行 10 次子迭代）走时残差的均方差已降到 ±0.02s，由此而引起的速度相对误差为 ±0.03%．

四、反演结果

图 6 给出了阿德朗达克—西魁北克地震带及邻近地区深达 25km 地壳分层速度反演的结果．为了使成像的速度分布较为合理，采用了移动窗平滑方法以获得连续光滑的数值变化，能较好地反映地壳结构（见彩色图版 I，色标同图 8）．由图可见，出现在这些不同深度范围重要的速度异常与阿德朗达克穹隆山有关．在穹隆山的上层（图 6a）显示为正速度异常，而深层显示为负速度异常（图 6d），其速度扰动达到 ±4%．另一正速度异常位于地震带的中央位置深处（图 6d）．而其余地区，速度扰动相对较小，仅变化 ±1%—±2% 左右．下面分别讨论各层的速度结构特征．

第一层 0—5km（图 6a）　这一层的速度扰动与地表地质特征有一定的联系．正速度异常（+4%）位于阿德朗达克隆起带的中南部，而较弱的负速度值（−1%）环绕着正速度异常．实际上，阿德朗达克是北美前寒武纪地盾上最高的一座穹隆山，它在地形及地质上又可分为几部分．在中央高地，古生代岩层被剥蚀并暴露出元古代变质岩基底；在中央高地以东地区海拔达 1200m，它与弱的负速度异常对应；在切普林湖，高程急剧下降到 30m，显示为弱的正速度异常．在圣劳伦斯地台蒙特利尔附近为弱的负异常区，而中央变质沉积带及安大略片麻岩带，渥太华周围的广大地区显示为弱正异常（+1%）．

第二层 5—10km（图 6b）　本层速度变化不大，是相对均匀的介质层．弱的负速度异常（小于 −1%）出现在阿德朗达克中央地区以及蒙特利尔东北的圣劳伦斯地台及中央麻粒岩地体下方．从切普林湖到渥太华北西向及中央变质岩带北东向则显示为弱的正异常．

第三层 10—15km（图 6c）　本层介质也较均匀，其速度扰动不超过 ±2%．在中央变质沉积带渥太华以北地区出现一个较明显的正速度异常．在阿德朗达克隆起带，仍然显示为弱的负异常．

第四层 15—25km（图 6d）　这一层速度扰动十分显著，在阿德朗达克穹隆山下部出现较强的负速度异常（−4%），而在阿德朗达克—西魁北克地震带的中央部位（蒙特利尔西南，渥太华东南）出现正速度异常（+4%）．这一层的速度变化反映了该地震带的深部构造及地球动力学过程．

五、讨　论

由以上速度成像结果可知，研究区域最主要的速度异常分布在阿德朗达克穹隆山及

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

地震活动的中央部位。对这些速度异常结构可作如下解释。

位于北美东部地盾区的阿德朗达克穹隆山是近代快速上升的异常地质体，估计从晚泥盆纪以来已上升了约 1600m。根据 1931—1975 年水准测量结果，发现穹隆山中央部分的上升率每年达 3.7mm，因此它是一个已经形成并在不断发展的现代穹隆上升山[20-22]。由于穹隆山上升而使其顶部的古生界地层被剥蚀，而只剩下由片麻岩、麻粒岩等变质岩系构成的元古界基底。因此，我们推测浅部的正速度异常与上层的古老变质岩有关。

1977 年，曾在阿德朗达克穹隆山进行了人工场源及天然场源的电磁场观测，发现穹隆山下深约22km的下地壳有一厚 6—12km 的高导层，其电导率达$(4—8)\times10^{-2}\Omega^{-1}m^{-1}$，相对于上地壳增高了约 100 倍[23]。

1980—1981 年，又在该穹隆山作过 COCORP 反射地震观测[24-26]，在阿德朗达克的中部及东部地区，发现下地壳 18—26km 深处出现十分强烈的反射层，该反射层由一组称为 Tahawus 的杂岩带引起。Tahawus 杂岩在反射剖面上显示为许多水平反射段，推测它们可能由片麻岩、堆积的火成岩层或沉积变质岩引起。

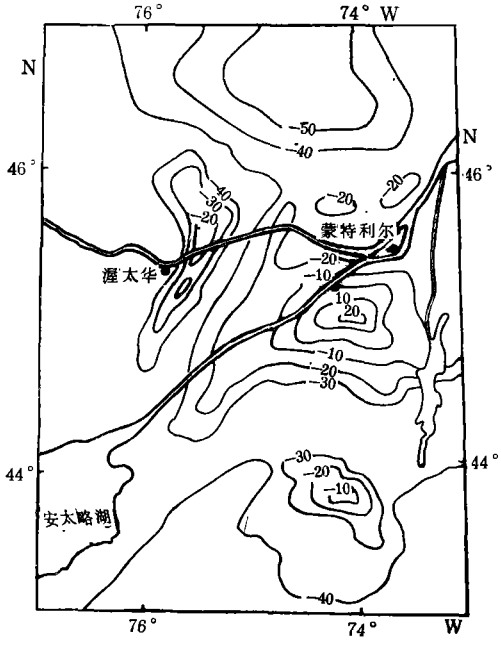

图 7 阿德朗达克—西魁北克地震带的布格重力异常图(单位 mGal)

层析反演结果在穹隆山下 15—25 km 深处正是一低速异常区，它和上述的高导层及强反射带的空间范围基本符合。对于这一高导低速的深层物质，过去认为是由于基岩的物性及含水等因素引起，然而，这种推论并不能与穹隆山其它地质地球物理特征吻合。

考虑到目前阿德朗达克穹隆山还在不断快速上升，而引起上升最可能的原因是地壳深部或地幔存在热源，部分熔融物质上升所致，因此我们将深部的低速高导层解释为部分融熔的高温岩体或岩浆囊。穹隆山可以看作正在熔化的现代大陆热点。和世界上其它热点比较，阿德朗达克穹隆山主要是缺乏现代火山活动及热泉活动。对于这一点可作如下解释：阿德朗达克是一个发展中的热点，其热源前锋虽在上升，但离地表还有相当一段距离，因此在地表尚不能直接观测到地热活动[21]。

在阿德朗达克—西魁北克地震带中央部位 15—25km 深处出现的正速度异常，正好与渥太华及蒙特利尔之间的布格重力正异常（+20mGal）相对应，如图 7 所示。关于引起重力正异常的原因曾被解释为由深成的超基性岩脉状杂岩引起。因此，我们推测这些深成的超基性杂岩也可能是引起正速度异常的原因。

如上所述，第二及第三层仅显示 1%—2% 的速度扰动值，这表明该两层速度比较均

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

匀．但也反映出地壳内西北侧的片麻岩基底和东侧的麻粒岩地体的岩性不一致，因而出现速度扰动．

对比图 1 及图 2 可以看出，阿德朗达克—西魁北克地震带的地震活动性与地面断裂并不一致，大多数断裂是 EW 方向延伸的，而地震活动却沿 NW 方向展布．震源机制解的结果表明，大多数地震都沿陡倾的 NW 向逆断层面错动，主压应力 P 轴为 NE 方向而且主要呈现为水平挤压，这和北美大陆板块的运动方向是一致的[8]．因此，推测这一地区的地震主要是由于地壳内岩石受 NE 方向压应力引起 NW 向剪切破裂发生，而与地面 EW 向断裂无直接联系．

根据速度层析成像的结果，沿地震带 NNW—SSE 方向切割一条剖面(图 8)，图 8 给出了阿德朗达克—西魁北克地震带速度扰动分布与震源深度分布的关系（见彩色图版 II)，图中"●"为震源在 NNW—SSE 断面上的投影位置，震级 M_b:2—5级．由图可见，这些地震几乎都发生在速度较高的脆性岩石区，那里一般都分布着深变质的脆性岩体，在应力作用下易于破裂释放出地震能量．相反地，在速度较低的柔性岩石区(那里很可能是部分融熔的高温带)几乎不发生地震．因此我们认为阿德朗达克—西魁北克地震带的地震活动是在区域应力作用下，在异常地壳结构区内脆性岩石破裂而引起，即地震的发生是受岩性控制，而与地面已有断裂不存在联系．

六、结　论

利用加拿大及美国设在阿德朗达克—西魁北克地震带的数字地震仪台网的直达 P 波观测到时，对该区地壳内三维速度结构进行层析成像，发现了阿德朗达克穹隆山的速度异常．该异常显示在穹隆山下地壳 15—25km 深处是一低速层，结合其它地质地球物理资料，可以将这一低速异常层解释为岩浆囊或局部融熔的高温带．因此，阿德朗达克穹隆山是北美东部地盾区正在演化的一个大陆热点．由于它发展较晚，所以热源前锋尚未到达地表附近，因而缺乏火山及热泉活动．

阿德朗达克—西魁北克地震带的地震活动与地表断裂关系不大．在区域水平应力作用下，较脆性的坚硬岩石破裂而辐射出地震能量，而柔性的高温部分融熔岩石几乎不发生地震．说明该区地震活动性很大程度上受到岩性控制，而不是沿已有断裂发生．

本文在资料收集过程中，得到加拿大地质调查局地球物理研究所及美国拉蒙特-多尔蒂地质调查所的大力协助；还得到加拿大多伦多大学科学基金的支持，在此表示谢意．

参　考　文　献

[1] Oliver, J., Johnson, T. and Dorman, J., Postglacial faulting and seismicity in New York and Quebec. *Can. J. Earth Sci.*, 7, 579—590, 1970.

[2] Sbar, M. L. and Sykes, L. R., Seismicity and lithospheric stress in New York and adjacent areas, *J. Geophys. Res.*, 82, 5771—5786, 1977.

[3] Seeber, L. and Armbruster, J. G., A study of earthquake hazards in New York and adjacent areas, Final report covering the period 1982—1985, NUREG/CR-4750, 1986.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[4] Yang, J. -P. and Aggarwal, Y. P., Seismotectonics of northeastern United States and adjacent Canada, *J. Geophys. Res.*, **86**, 4981—4998. 1981.

[5] Lablanc, G. and Buchbinder, G., Second microearthquake survey of the St. Lawrence Valley near La Malbaic, Quebec, *Can. J. Earth Sci.*, **14**, 1778—1789, 1977.

[6] Forsyth, D. A., Characteristics of the western Quebec seismic zone, *Can. J. Earth Sci.*, **18**, 103—119, 1981.

[7] Hasegawa, H. S., Adams, J., and Yamazaki, K., Upper crustal stresses and vertical stress migration in eastern Canada, *J. Geophys. Res.*, **90**, 3637—3648, 1985.

[8] Wahlstrom, R., Focal mechanisms of earthquakes in southern Quebec, southeastern Ontario, and northeastern New York with implications for regional seismotectonics and stress field characteristics, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **77**, 891—924, 1987.

[9] Mereu, R. F., Wang, D., Kuhn, O., Forsyth, D. A., Green, A. G., Morel, P., Buchbinder, G. G. R., Crossley, D., Schwarz, E., Duberger, R., Brooks, C., Clowes, R., The 1982 COCRUST seismic experiment across the Ottawa-Bonnechere graben and Grenville Front in Ontario and Quebec, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **84**, 491—514, 1986.

[10] Aki, K. and Lee, W. H. K., Determination of three-dimensional velocity anomalies under seismic array using first *P* arrival times from local earthquakes, 1, A homogeneous initial model, *J. Geophys. Res.*, **81**, 4381—4399 1976.

[11] Aki, K., Christoffersson, A. and Husebye, E. S., Determination of three-dimensional seismic structure of the lithosphere, *J. Geophys. Res.*, **82**, 277—296, 1977.

[12] Hearn, T. M. and Clayton, R. W., Lateral variations in southern California. II. Results for the lower crust from Pn waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **76**, 511—520, 1986.

[13] Humphreys, E., Clayton, R. W. and Hager, B. H., A tomographic image of mantle structure beneath southern California, *Geophys. Res. Lett.*, **11**, 625—627, 1984.

[14] Dines, K. A. and Lytle, R. J., Computerized geophysical tomography, *Proc. IEEE*, **67**, 1065—1073, 1979.

[15] McMechan, G. A., Seismic tomography in boreholes, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **74**, 601—612, 1983.

[16] McMechan, G. A., Harris, J. M. and Anderson, L. M., Crosshole tomography for strongly variable media with applications to scale mode data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **77**, 1945—1960, 1987.

[17] Suetsugu, D. and Nakanishi, I., Tomographic inversion and resolution for Rayleigh wave phase velocities in the Pacific ocean, *J. Phys. Earth*, **33**, 345—368, 1985.

[18] Nakanishi, I., Three-dimensional structure beneath the Hokkaido-Tohoku region as derived from a tomographic inversion of *P*-arrival times, *J. Phys. Earth*, **33**, 241—256, 1985.

[19] 朱介寿、刘福田、王椿镛、陆涵行、骆循，研究地壳上地幔结构的地震体波计算方法，科学出版社，1988.

[20] Isachsen, Y. W., Possible evidence for contemporary doming of the Adirondack Mountains, New York, and suggested implications for regional tectonics and seismicity, *Tectonophysics*, **29**, 169—181, 1975.

[21] Isachsen, Y. W., Contemporary doming of the Adirondack Mountains: further evidence from releveling, *Tectonophysics*, **71**, 95—96, 1981.

[22] Isachsen, Y. W., Structural and tectonic studies in New York state, Final report, July 1981-June 1982, NUREG/CR-3178, 1985.

[23] Connerney, J. E. P., Nekut, A. and Kuckes, A. F., Deep crustal electrical conductivity in the Adirondacks, *J. Geophys. Res.*, **85**, 2603—2614, 1980.

[24] Berry, M. J., and Fuchs, K., Crustal structure of the Superior and Grenville province of the northeastern Canadian shield, *Bull. Seism Soc. Am.*, **63**, 1393—1432, 1973.

[25] Klemperer, S. L., Brown, L. D., Oliver, J. E., Ando, G. J., Czuchra, B. L. and Kaufman, S., Some results of COCORP seismic reflection profiling in the Grenville-age Aditondack Mountains, New York State, *Can. J. Earth Sci.*, **22**, 141—153, 1985.

[26] Brown, L., Ando, C. J., Klemperer, S., Oliver, J., Kaufman, S., Gzuchra, B., Walsh, T., Isachsen, Y., Adirondack-Appalachian crust structure: The COCORP northeast traverse, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **94**, 1173—1184, 1983.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

IMAGING THREE DIMENSIONAL CRUSTAL VELOCITY STRUCTURE ALONG THE ADIRONDACK—WESTERN QUEBEC SEISMIC ZONE

ZHU JIE-SHOU[1)]　K.-Y. CHUN[2)]　LUO XUN[1)]　G. F. WEST[2)]　R. K. KOKOSKI[2)]

Abstract

Based on seismic tomographic technique, the three dimensional crustal velocity structure has been inverted along the Adirondack—western Quebec seismic zone, the data of the first *P* arrival from local earthquakes are collected from 59 shortperiod digital seismographic stations which located in the seismic zone and its adjacent area.

The results of invertion indicate that the positive velocity anomaly is appeared in the first layer of the crust (0—5 km in depth); and the velocity varies weakly showing lateral homogeneous relatively in the second layer (5—10 km) and the third layer (10—15 km); and the contemporary anomalous velocity structure has found in the fourth layer (15—25 km), in which positive velocity anomaly (+4%) is coincided with the centre of the Bouguer gravity positive anomaly, and a negative velocity anomaly (−4%) is beneath the mid-south part of Adirondack uplift. Comparing with the geological and geophysical evidences the Adirondack mountain can be explained an undergoing domical uplift and hot spot as the mechanism of doming but the front of the thermal pulse has not arrived at surface in the continent.

Key words　Adirondack—western Quebec seismic zone, Seismic tomography, Seismicity, Continental hot spot.

1) Chengdu College of Geology, Chengdu 610059, China.
2) University of Toronto, Canada.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

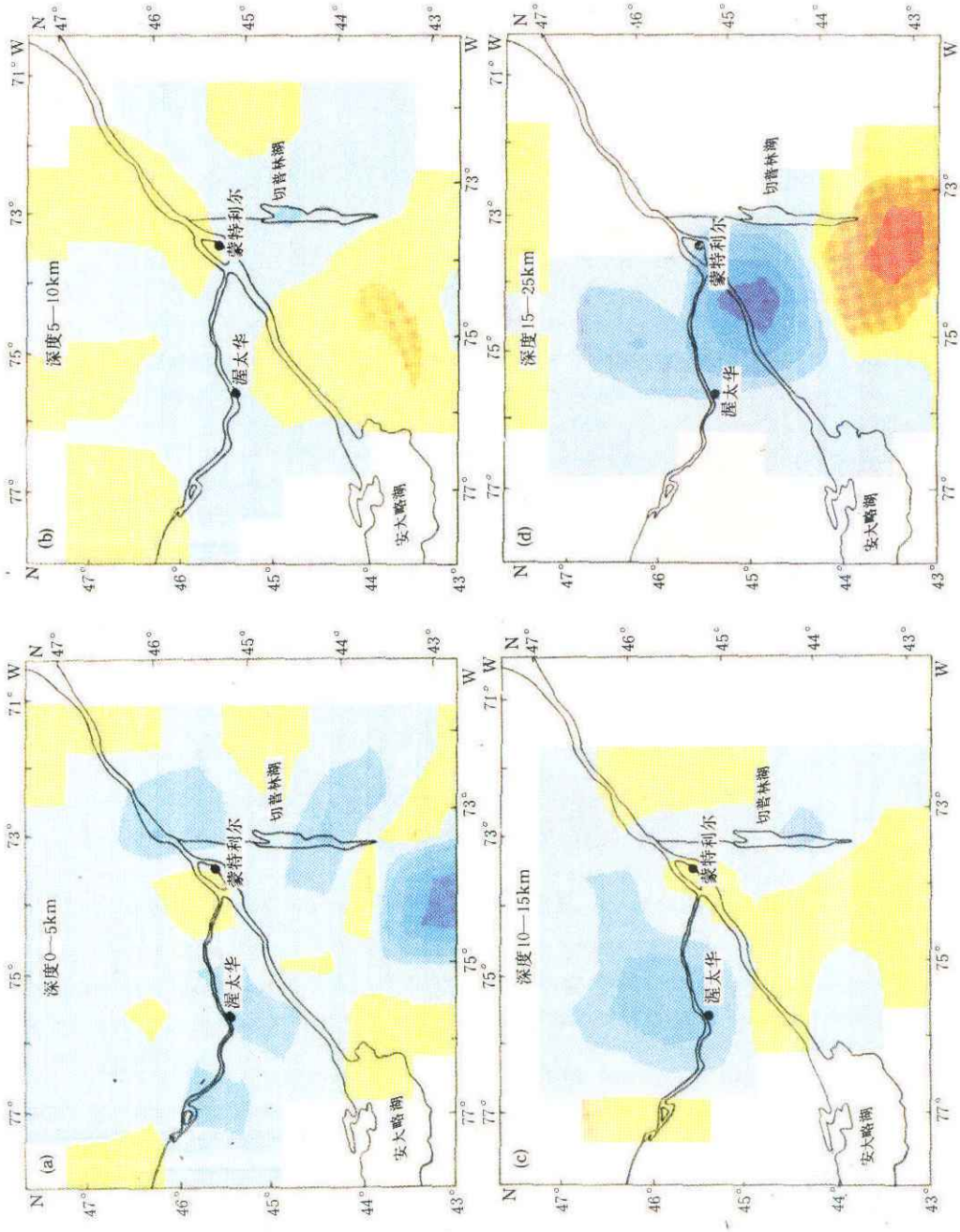

图 6 Fig.6

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

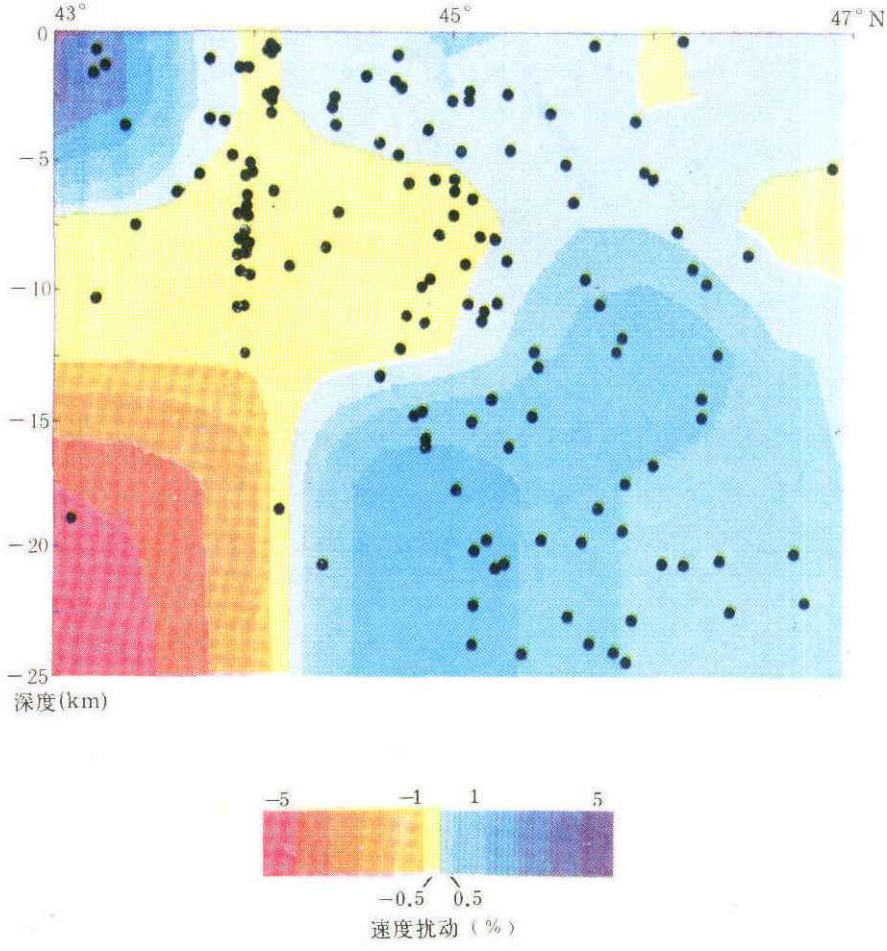

图 8　Fig. 8

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net