根据地震纵波速度分析青藏高原地壳放射性生热率和地幔热状态

管彦武[1],管 烨[2],高 瑞[2],孙晓华[3],金 旭[1]

1. 吉林大学地球探测科学与技术学院,长春 130026
2. 中国地质科学院地质研究所岩石圈中心,北京 100037
3. 吉林财经大学经济学院,长春 130017

摘要:从 1974 年至今,人们对青藏高原的研究积累了大量的地球物理资料。笔者搜集了 23 条地震剖面纵波数据,利用地震纵波速度和生热率的关系,绘制了各条剖面的地壳岩石生热率随深度变化的等值线,并结合已有的大地热流数据,得到了地幔热流密度分布情况。从地幔热流密度分布可以看出:在班公—怒江缝合带、印度—雅鲁藏布江缝合带、拉萨地体上存在地幔热流较高区域;该区域位于地块碰撞挤压带上,地层构造复杂,地热资源丰富,以著名的羊八井地热田为代表。初步推断该区域地幔岩浆较活跃。

关键词:青藏高原;地壳;A-V_p;放射性生热率;地震纵波波速;大地热流

中图分类号:P631.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5888(2012)02-0562-07

Crustal Radiogenic Heat and Mantle Geothermal Status in Tibetan Plateau Based on P-Wave Velocity

Guan Yan-wu[1], Guan Ye[2], Gao Rui[2], Sun Xiao-hua[3], Jin Xu[1]

1. *College of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun* 130026, *China*
2. *Lithosphere Research Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037
3. *Economics School, Jilin University of Finance and Economics, Changchun* 130017, *China*

Abstract: A large amount of geophysical data of Tibetan Plateau has been accumulated since 1974 when the modern geophysical exploration about Tibetan Plateau began. P-wave velocities of 23 deep seismic sounding profiles are collected and relationship curve of crustal radiogenic heat and P-wave velocity (A-V_p) in each profile was plotted. The mantle heat flow contour map of Tibetan Plateau is drawn reference to terrestrial heat flow data sets. There is a very high mantle heat flow area on the Bangong-Nujiang suture zone, Indus-Yarlung suture and Lhasa block. It can be infered that the magma under the area is possible active.

Key words: Tibetan Plateau; crust; A-V_p; radiogenic heat; seismic compression-wave velocity; heat flow

收稿日期:2011-07-22

基金项目:国家自然科学基金项目(40974047);中国地质科学院地质研究所基本科研业务费(2010-sys-04);国土资源部专项(SinoProbe-09-01);吉林大学基本科研业务费(450060445194)

作者简介:管彦武(1976—),男,讲师,博士,主要从事重磁勘探和地热学的教学和科研工作,E-mail:guanyw@jlu.edu.cn。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0　引言

无论从区域地质还是深部地质来说，青藏高原都是全球最高、最年轻的高原。国际岩石圈计划、国际地圈与生物圈计划以及美国大陆动力学国家计划等都对青藏高原给予了高度的重视，并把其作为野外天然实验室[1-2]，重点进行了大陆地质和地球物理的基础研究。1974 年，原中国科学院地球物理研究所等单位开始进行亚东—当雄地学断面物探工作，青藏高原拉开了地球物理勘探的序幕，至今进行了多条大的地学断面勘探。笔者搜集了 23 条广角地震剖面纵波速度数据，剖面总里程达 6 000 km；并根据地震纵波速度和地壳生热率的关系[3-4]，勾绘出这些剖面地壳放射性生热率的垂向分布等值线图。

大地热流密度是一个综合性参数，它是地球内热在地表可观测到的唯一物理量。地表大地热流密度是地幔热流密度和地壳热流密度之和，地壳热流主要来自地壳放射性衰变生热。故而结合地表大地热流密度实测数据，可推算出地幔热流密度。这为研究青藏高原的地质构造和深层热状态提供了很有价值的参考。

1　放射性生热率推算方法

不少人研究过地壳放射性生热率和地震纵波之间的关系（A-V_p），其中被广泛接受的是 1984 年由 Rybach 和 Buntebath 提出的关系式[5]：

$$\ln(A)=B-2.17V_p。\tag{1}$$

其中：A 为放射性生热率，$\mu W/m^3$；V_p 为地震波纵波速度，km/s；B 是常数项，前寒武纪等于 13.7，显生宙等于 12.6。由于青藏高原地层比较新，基本都在显生宙，故这里采用显生宙的关系式，即 $B=12.6$ 进行放射性生热率的推算。

式(1)是在实验室条件（20 ℃，100 MPa，下同）下得到的；实际工作中应用时，必须将实际地下的温度、压强转换到实验室条件下。详细处理方法的讨论见文献[3]，推算方法如下：

$$V_p(20,100)=V_p(T,P)\left[1+\frac{B(z)}{V_p(T,P)}\right]。$$

其中：$V_p(20,100)$为实验室条件下的纵波速度，km/s；$V_p(T,P)$为实际地下一定温度压强条件下的纵波速度，km/s；$B(z)$为一定深度处的改正量，km/s，是一个统计量，经回归分析得到。笔者采用线性插值的方法获取相应深度处的改正量。

2　各条剖面岩石放射性生热率分布情况

搜集到的 23 条广角地震剖面分布见图 1，将图 1 中各条剖面的序号按照工程执行年代进行编号，详细情况见表 1。

在张中杰等[7]2010 年得出的 23 条地震剖面纵波速度的基础上，利用式(1)推算出各条剖面地壳生热率垂向分布图。克里金插值方法是对空间分布数据求线性最优、无偏内插估计的一种方法，使用条件是区域变化量存在空间相关性。笔者直接根据计算结果采用克里金插值方法，绘制出剖面放射性生热率等值线图（图 2）。

从图 2 中可以看出，各条剖面生热率和各地块、缝合线等地质构造有一定的对应关系。如剖面 1 中，喜马拉雅地块和拉萨地块近地表放射性生热率都较高，而印度—雅鲁藏布江缝合带刚好对应着生热率高和低的交接处。因为地层越老放射性生热率越低，反之亦然，故这反映了喜马拉雅地块和拉萨地块相对较新。从剖面 17 可以看出，对班公—怒江缝合带南北作比较，放射性生热率西南部明显比东北部低，反映出缝合带西南比东北地层古老。这正好与潘桂棠等[33]2004 年得出的结果一致。对于其他剖面也有类似的结论，详见各条剖面图（图 2），这里不再一一列举。

从地壳岩石放射性生热率的角度，青藏高原地壳大体上分 3 层：上部、中部和下部。上部平均深度为 20 km 以内，生热率相对较高，约为 3.2～5.4 $\mu W/m^3$；中部平均深度为 15～40 km，放射性生热率中等，约为 0.8～2.8 $\mu W/m^3$；下部平均深度为 40～60 km，放射性生热率较小，为 0.8 $\mu W/m^3$。

3　青藏高原地幔热流

通常观测到的大地热流密度（Q）是地幔热流密度（Q_m）和地壳热流密度（Q_c）之和：

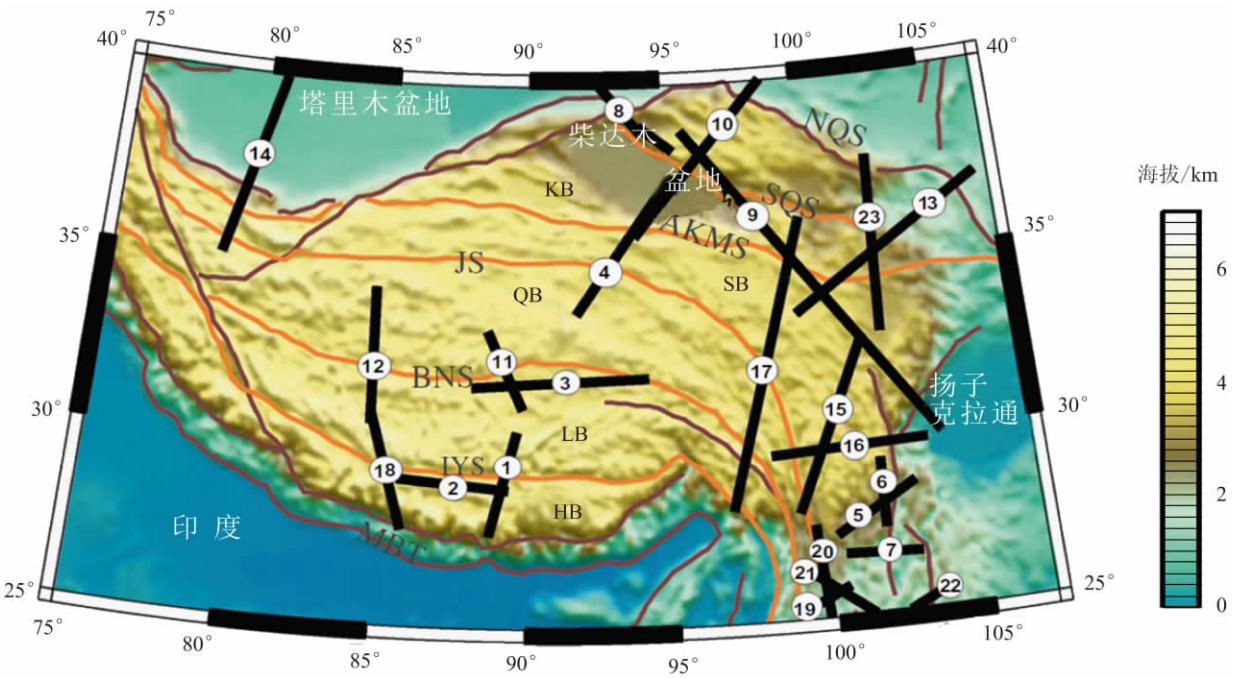
$$Q=Q_m+Q_c。$$

而地壳热流主要来自于地壳中岩石放射性衰变产生的热量，计算方法为

$$Q_c=\sum_{i=1}^{n}A_i\cdot D_i。$$

其中，A_i 和 D_i 分别表示第 i 层的放射性生热率和该层的厚度[3-4]。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



MBT. 主要逆冲边界；HB. 喜马拉雅地块；LB. 拉萨地块；QB. 羌塘地块；SB. 松潘—甘孜地块；KB. 昆仑—柴达木地块；IYS. 印度—雅鲁藏布江缝合带；BNS. 班公—怒江缝合带；JS. 金沙江缝合带；AKMS. 阿尼玛卿—昆仑缝合带；SQS. 南祁连山缝合带；NQS. 北祁连山缝合带。下同。

图1 1974年以来青藏高原广角地震剖面分布(据文献[6]和[7]，略做修改)

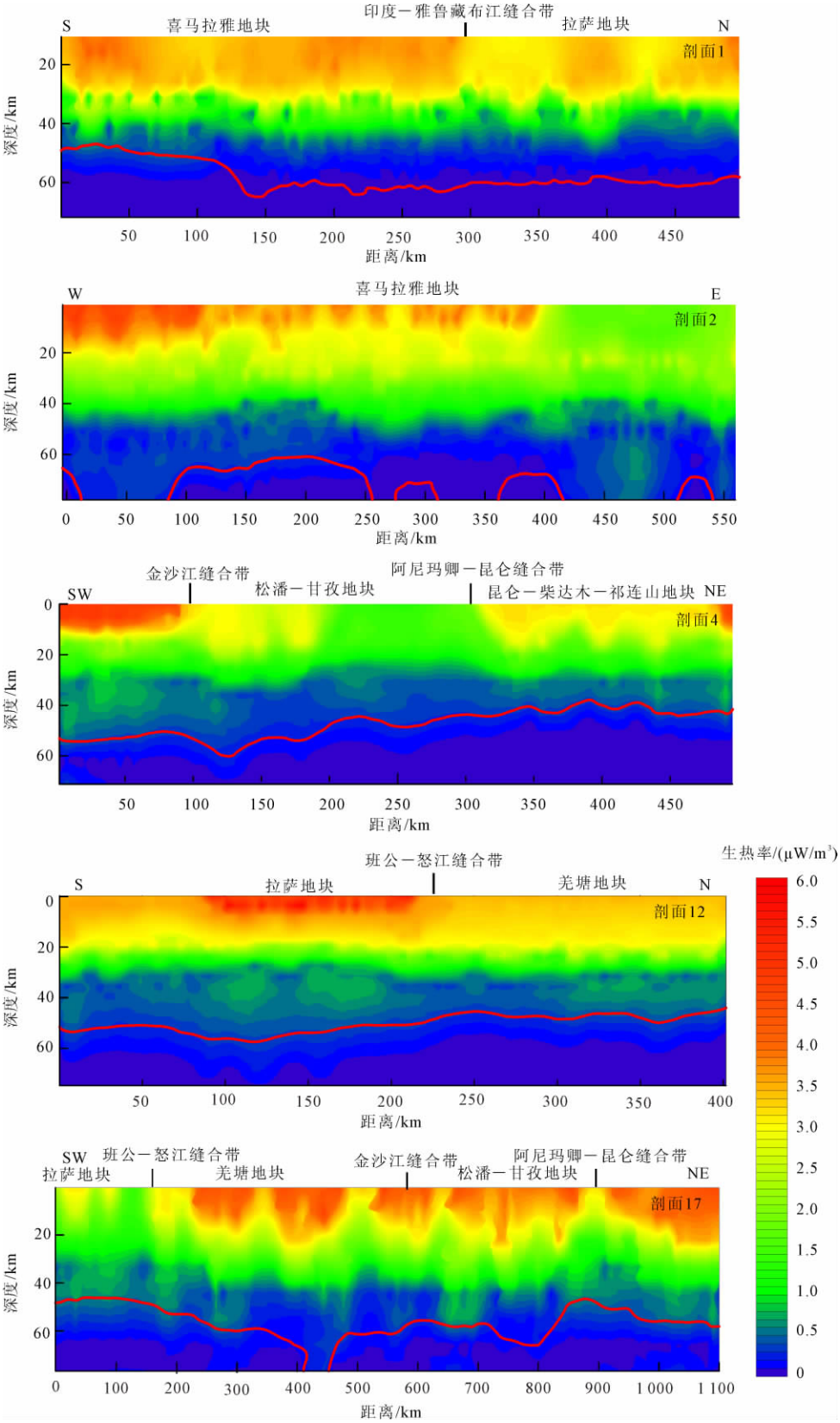
Fig. 1 Geographic location of different wide-angle seismic profiles in Tibet since 1974

表1 1974年以来青藏高原广角地震剖面信息表

Table 1 Information on wide-angle seismic profiles in Tibet Plateau since 1974

编号	剖面	执行单位	执行年代	参考文献
1	亚东—当雄	前地球物理所	1974	[8-9]
2	佩枯错—普莫雍错	中法合作	1980—1982	[10]
3	色林错—雅安多	中法合作	1980—1982	[11]
4	沱沱河—格尔木	国土资源部	1988	[12]
5	丽江—新市镇	前地球物理所	1984	[13]
6	长河坝—拉鲊	前地球物理所	1984	[13]
7	丽江—者海	前地球物理所	1984	[14]
8	阿尔金—阿尔泰	国土资源部	1988	[15]
9	阿尔泰—龙门山	国土资源部	1989	[16]
10	格尔木—额济纳旗	前地球物理所	1992	[17]
11	德庆—龙尾错(龙尾湖)	中美合作(INDEPTH计划)	1992—2002	[18]
12	措勤—三个湖	前地球物理所	1994	[19]
13	玛沁—靖边	中国地震局	1997	[20]
14	西昆仑—塔里木	国土资源部	1995—2000	[21]
15	唐克—奔子栏	中国地震局，国土资源部	2000	[22]
16	竹巴龙—孜中	中国地震局	2000	[23]
17	下察隅—共和	前地球物理所	2001	[24]
18	措勤—樟木	前地球物理所	2001	[25]
19	遮放—宾川	中国地震局	2002	[26-28]
20	思茅—中甸	中国地震局	2002	[29]
21	洱源—江川	中国地震局	2002	[30]
22	孟连—马龙	中国地震局	2002	[26，28，31]
23	玛康—古浪	中国地震局	2004	[32]

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



红色线条是地震波纵波为 7.0 km/s 的等值线，近似代表各条剖面中的莫霍界面。

图 2　几条剖面地壳岩石放射性生热率分布情况

Fig. 2　Contour maps of radiogenic heat generation in each profile

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

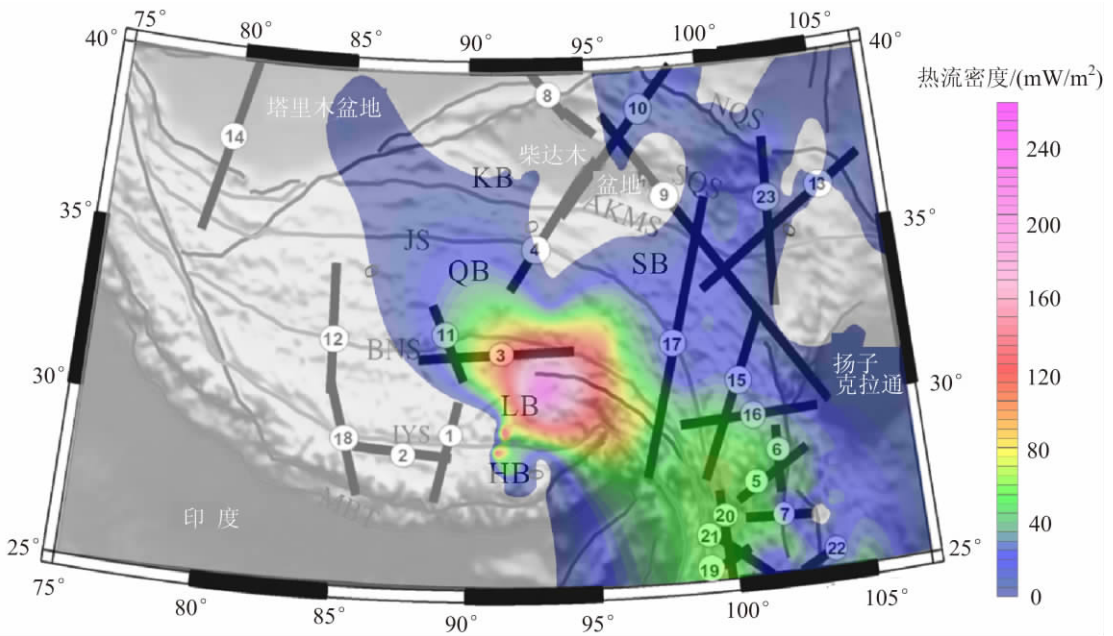


图3 青藏高原地幔热流等值线图(在文献[5]和[6]基础上绘制)

Fig. 3 Contour map of Tibetan Plateau mantle heat flow

将已有的大地热流密度[34]减去地壳热流密度,即可得地幔热流密度:

$$Q_m = Q - Q_c。$$

参考相关的地学资料[35],可以绘制出青藏高原地幔大地热流密度平面等值线图,并将其与地形图叠合在一块,如图3所示。

从图3中可以看出:在拉萨地块和羌塘地块东北部(班公—怒江缝合带、印度—雅鲁藏布江缝合带周边)有一个明显的高地幔热流区域,最大值可达260 mW/m²;在青藏高原东南部,也有一个高热流区域。这2个高地幔热流区域反映该处莫霍界面热流较高,或者说该处地幔较活跃。在青藏高原西部和东北部,由于没有实测热流数据或者数据稀少,在插值计算中出现负值,对其进行了白化处理。

在班公—怒江缝合带、印度—雅鲁藏布江缝合带和拉萨地块处出现的高地幔热流区域,其它资料也可印证。比如,从地表GPS监测结果可见,该缝合带现在仍在相互挤压、旋回[36]。从MAGSAT卫星亚洲总磁异常图看,班公—怒江缝合带以北是亚洲地区最大的正磁异常区——塔里木正磁异常区,中心位于84°E、38°N处,中心强度为10.2 nT。中国西部最醒目的负磁异常大致在该缝合带以南的喜马拉雅负异常区,异常中心位于86°E、28°N处,负异常中心强度为-9.9 nT[36]。班公—怒江缝合带处于正负磁异常的梯度带上。从地震层析成像看,该缝合带下正好是印度岩石圈地幔和亚洲大陆岩石圈地幔碰撞的地带[33],地幔比较活跃。

4 结束语

根据地壳地震纵波和地壳放射性生热率之间的关系,运用青藏高原近36年来的广角深反射地震纵波数据,参考相关的地学资料,将地表热流减去地壳放射性生热产生的热流,即可得到来自地幔的大地热流成分。这样可绘制出青藏高原地幔热流密度等值线图。青藏高原处于欧亚板块和印度板块碰撞俯冲地带,在班公—怒江缝合带处存在一个高地幔热流区域,这反映了该处地幔较活跃。在这里,不仅有大量来自地幔的热流,还有碰撞挤压摩擦产生的热。笔者在推算地幔热流的过程中没有考虑到摩擦生热,而是将摩擦产生的热流归算到了地幔热流密度里;故文中根据地震纵波速度推算地幔热流有一定的误差,有时候甚至比较大。虽然不是很完美,但是对于区域构造等问题,定性的判断地幔冷热还是提供了一个比较有参考价值的参数。

感谢中国科学院张中杰研究员提供宝贵资料,感谢中国地质科学院地质研究所李秋生研究员有益的交谈!

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献(References)：

[1] 于学政，金玉声，杨红日，等. 藏东遥感地质与矿产资源[M]. 北京：地质出版社. 2003.
Yu Xue-zheng, Jin Yu-sheng, Yang Hong-ri, et al. Eastern Tibetan Plateau RS Geology and Mineral Resources[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.

[2] 潘裕生，孔祥儒. 青藏高原岩石圈结构演化与动力学[M]. 广州：广东科技出版社. 1997.
Pan Yu-sheng, Kong Xiang-ru. Tibetan Plateau Lithosphere Structure Evolution and Dynamics[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Publishing House, 1997.

[3] Cermak V. Crustal Heat Production and Mantle Heat Flow in Central and Eastern Europe [J]. Tectonophysics, 1989, 159:195-215.

[4] Beardsmore G R, Cull J P. Crustal Heat Flow: A Guide to Measurement and Modeling [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002:1-319.

[5] Rybach L, Buntebacrth G. The Variation of Heat Generation, Density and Seismic Velocity with Rock Type in the Continental Lithosphere [J]. Tectonophysics, 1984, 103(1/4):335-344.

[6] An Y, Harrison T M. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2000, 28: 211-280.

[7] Zhang Z J, Deng Y F, Teng J W, et al. An Overview of the Crustal Structure of the Tibetan Plateau After 35 Years of Deep Seismic Soundings[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(3): 977-989.

[8] 滕吉文，熊绍柏，孙克忠，等. 西藏高原当雄—亚东地带地壳与上地幔结构和速度分布的爆炸地震研究[J]. 地球物理学报, 1981, 24(2): 155-170.
Teng Ji-wen, Xiong Shao-bai, Sun Ke-zhong, et al. Explosion Seismic Study for Velocity Distribution and Structure of the Crust and Upper Mantle from Damxung to Yadong of Xizang Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1981, 24 (2): 155-170.

[9] Teng J W, Sun K Z. Deep Seismic Reflection Waves and Structure of the Crust from Danxiong to Yadong on the Xizang Plateau (Tibet)[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1983, 31(4): 293-306.

[10] Zhang Z J, Teng J W, Li Y K, et al. Crustal Structure of Seismic Velocity in Southern Tibet and East-Westward Escape of the Crustal Material: An Example by Wide-Angle Seismic Profile from Peigu Tso to Pumoyong Tso[J]. Science in China: Series D, 2004, 47(6): 500-506.

[11] 张中杰，滕吉文，李英康，等. 藏南地壳速度结构与地壳物质东西向"逃逸"：以佩枯错—普莫雍错宽角反射剖面为例[J]. 中国科学：D 辑，2002，45 (6)：550-558.
Zhang Zhong-jie, Teng Ji-wen, Li Ying-kang, et al. East-West Crustal Structure and "Down-Bowing" Moho Under the Northern Tibet Revealed by Wide-Angle Seismic Profile[J]. Science in China: Series D, 2002, 45 (6): 550-558.

[12] 李秋生，彭苏萍，高锐，等. 青藏高原北部巴颜喀拉构造带基底隆起的地震学证据[J]. 地质通报，2003，22(10)：782-788.
Li Qiu-sheng, Peng Su-ping, Gao Rui, et al. Seismic Evidence of the Basement Uplift in the Bayan Har Tectonic Belt, Qinghai, and Its Tectonic Significance [J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(10): 782-788.

[13] 崔作舟，卢德源，陈纪平，等. 攀西地区的深部地壳结构与构造[J]. 地球物理学报，1987，30(6)：566-580.
Cui Zuo-zhou, Lu De-yuan, Chen Ji-ping, et al, The Deep Structural and Tectonic Features of the Crust in Panxi Area [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1987, 30(6): 566-580.

[14] 熊绍柏，郑晔，尹周勋，等. 丽江—攀枝花—者海地带二维地壳结构及其构造意义[J]. 地球物理学报. 1993, 36(4): 434-444.
Xiong Shao-bai, Zheng Ye, Yin Zhou-xun, et al. The 2-D Structure and It's Tectonic Implications of the Crust in the Lijiang-Panzhihua-Zhehai Region [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1993, 36 (4): 434-444.

[15] 王有学，韩果花，姜枚，等. 阿尔泰—阿尔金地学断面地壳结构[J]. 地球物理学报, 2004, 47(2): 240-249.
Wang You-xue, Han Guo-hua, Jiang Mei, et al. Crustal Structure Along the Geosciences Transect from Altay to Altun Tagh[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(2): 240-249.

[16] 王有学，Mooney W D，韩果花，等. 台湾—阿尔泰地学断面阿尔金—龙门山剖面的地壳纵波速度结构[J]. 地球物理学报，2005，48(1)：98-106.
Wang You-xue, Mooney W D, Han Guo-hua, et al. Crustal P-Wave Velocity Structure from Altyn Tagh to Longmen Mountains Along the Taiwan-Altay Geoscience Transect [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 98-106.

[17] 崔作舟，李秋生，吴朝东，等. 格尔木—额济纳旗地学

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

断面的地壳结构和深部构造[J]. 地球物理学报, 1995, 38(增刊1): 15-28.
Cui Zuo-zhou, Li Qiu-sheng, Wu Chao-dong, et al. The Crustal and Deep Structures in Golmud-Ejinaqi GGT[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(Sup.1): 15-28.

[18] Zhao W J, Mechie J, Brown L D, et al. Crustal Structure of Central Tibet as Derived from Indepth Wide-Angle Seismic Data[J]. Geophysical Journal International, 2001, 145: 486-498.

[19] 熊绍柏,刘洪兵. 青藏高原西部的地壳结构[J]. 科学通报, 1997, 42(12), 1309-1312.
Xiong Shao-bai, Liu Hong-bing. The Crustal Structure of Northern Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(12), 1309-1312.

[20] 李松林,张先康,张成科,等. 玛沁—兰州—靖边地震测深剖面地壳速度结构的初步研究[J]. 地球物理学报,2002,45(2):210-217.
Li Song-lin, Zhang Xian-kang, Zhang Cheng-ke, et al. A Preliminary Study on the Crustal Velocity Structure of Maqin-Lanzhou-Jingbian by Means of Deep Seismic Sounding Profile[J]. Chinese Journal of Geophysics,2002, 45(2): 210-217.

[21] Li Q S, Gao R, Lu D Y, et al. An Explosive Seismic Sounding Profile Across the Transition Zone Between West Kunlun Mts. and Tarim Basin[J]. Science in China:Series D, 2001, 44(7): 666-672.

[22] 王椿镛,韩渭宾,吴建平,等. 松潘—甘孜造山带地壳速度结构[J]. 地震学报,2003, 25(3): 229-241.
Wang Chun-yong, Han Wei-bin, Wu Jian-ping, et al. Crustal Structure Beneath the Songpan-Garze Orogenic Belt[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(3): 229-241.

[23] Wang C Y, Wu J P, Lou H, et al. P-Wave Crustal Velocity Structure in Western Sichuan and Eastern Tibetan Region[J]. Science in China:Series D:Earth Sciences, 2003, 46(Sup.): 254-265.

[24] Zhang Z J, Wang G J, Sun R M, et al. P-Wave Velocity of the Crust from Chayu, Xizang to Gonghe Qinghai in the Southeastern Tibet [C]//Robert Wesson. AGU Fall Meeting. San Francisco:[s.n.], 2003.

[25] 孙宏兵. 青藏高原深部物质物理属性和状态的三维结构及其深部动力学过程[R]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所, 2003.
Sun Hong-bing. Qinghai-Tibet Plateau Deep Material Physical Properties and the State of Three-Dimensional Structure and Deep Dynamic Process [R]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2003.

[26] 张中杰,白志明,王椿镛,等. 三江地区地壳结构及动力学意义:云南遮放—宾川地震反射/折射剖面的启示[J]. 中国科学:D辑,2005,35(4):314-319.
Zhang Zhong-jie, Bai Zhi-ming, Wang Chun-yong, et al. The Crustal Structure Under Sanjiang and Its Dynamic Implications: Revealed by Seismic Reflection/Refraction Profile Between Zhefang and Binchuan, Yunnan[J]. Science in China: Series D, 2005, 48 (9): 1329-1336.

[27] 白志明,王椿镛. 云南地区上部地壳结构和地震构造环境的层析成像研究[J]. 地震学报,2003, 25(3): 117-127.
Bai Zhi-ming, Wang Chun-yong. Tomographic Investigation of the Upper Crustal Structure and Seismotectonic Environments in Yunnan Province[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(3):117-127.

[28] 白志明,王椿镛. 云南遮放—宾川和孟连—马龙宽角地震剖面的层析成像研究[J]. 地球物理学报,2004, 47(2), 257-267.
Bai Zhi-ming, Wang Chun-yong. Tomography Research of the Zhefang-Binchuan and Menglian-Malong Wide-Angle Seismic Profiles in Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(2): 257-267.

[29] 张智,赵兵,张晰,等. 云南思茅—中甸地震剖面的地壳结构[J]. 地球物理学报, 2006,49(5),1377-1384.
Zhang Zhi, Zhao Bing, Zhang Xi, et al. Crustal Structure Beneath the Wide-Angle Seismic Profile Between Simao and Zhongdian in Yunnan [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1377-1384.

[30] 张智,徐春明,孟补在,等. 洱源—江川宽角地震剖面的地壳反射特征[J]. 地球物理学报, 2007, 50 (4): 1082-1088.
Zhang Zhi, Xu Chun-ming, Meng Bu-zai, et al. Crustal Reflectivity Characters from the Eryuan-Jiangchuan Wide-Angle Seismic Profile[J]. Chinese Journal of Geophysics,2007, 50(4): 1082-1088.

(下转574页)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Penetrating Radar's High Resolution Processing Method Based on Deconvolution [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(6):1201-1206.

[5] 王群,何云龙,王春和,等. 基于神经网络的探地雷达探雷研究[J]. 电波科学学报,2001, 16(3):398-403.
Wang Qun, He Yun-long, Wang Chun-he, et al. Study of Mine Detection with GPR Based on Neural Network [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16(3): 398-403.

[6] 高少武,魏庚雨,赵波,等. 可控震源地震数据子波最小相位化方法[J]. 石油地球物理勘探,2009 ,44(6): 685-689.
Gao Shao-wu, Wei Geng-yu, Zhao Bo, et al. Wavelet Minimum-Phasing Method for Vibroseis Seismic Data [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(6): 685-689.

[7] 刘秀娟,邓世坤,薛桂霞. 探地雷达信号子波提取及互相关滤波[J]. 勘察科学技术,2004(1):33-35.
Liu Xiu-juan, Deng Shi-kun, Xue Gui-xia. Extraction of Wavelet for Ground Penetrating Radar and Removal of Noise [J]. Site Investigation Science and Technology, 2004(1):33-35.

[8] 戴永寿,魏磊,霍志勇. 基于高阶累积量的线性化子波提取方法研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2006,30(4):24-29.
Dai Yong-shou, Wei Lei, Huo Zhi-yong. Research on Wavelet Extraction via Linear Equation Approach Based on Higher-Order Cumulant[J]. Journal of China University of Petroleum, 2006, 30(4):24-29.

[9] 陶然,邓兵,王越. 分数阶 Fourier 变换在信号处理领域的研究进展[J]. 中国科学:E 辑,2006,36(2): 113-136.
Tao Ran, Deng Bing, Wang Yue. The Research Progress of Fractional Fourier Transform in Signal Processing[J]. Science in China: Series E, 2006, 36(2): 113-136.

[10] Alper K M, Ozaktas M, Orhan A, et al. Optimal Filtering in Fractional Fourier Domains[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(5): 1129-1143.

(上接568页)

[31] 张中杰, 白志明, 王椿镛,等. 冈瓦纳型和扬子型地块地壳结构:以滇西孟连—马龙宽角反射剖面为例[J]. 中国科学:D 辑,2005, 34(5): 387-392.
Zhang Zhong-jie, Bai Zhi-ming, Wang Chun-yong, et al. Crustal Structure of Gondwana and Yangtze Typed Blocks: An Example by Wide-Angle Seismic Profile from Menglian to Malong in Western Yunnan [J]. Science in China: Series D, 2005, 48 (11): 1828-1836.

[32] 张先康, 杨卓欣,徐朝繁,等. 阿尼玛卿缝合带东段上地壳结构:马尔康—碌曲—古浪深地震测深剖面结果[J]. 地震学报,2007, 20(6): 628-640.
Zhang Xian-kang, Yang Zhuo-xin, Xu Zhao-fan, et al. Upper Crust Structure of Eastern A'nyemaqen Suture Zone: Results of Barkam-Luqu-Gulang Deep Seismic Sounding Profile [J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 20(6): 628-640.

[33] 潘桂棠, 朱弟成,王立全,等. 班公湖—怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据[J]. 地学前沿,2004, 11(7): 371-382.
Pan Gui-tang, Zhu Di-cheng, Wang Li-quan, et al. Bangong Lake-Nu River Suture Zone-the Northern Boundary of Gondwanaland: Evidence from Geology and Geophysics[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(7): 371-382.

[34] 管彦武,金旭,韩湘君,等. 基于 GIS 的中国大地热流数据库[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2005, 35(4): 525-528.
Guan Yan-wu, Jin Xu, Han Xiang-jun, et al. A Database of Terrestrial Heat Flow in China Based on GIS[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 35(4): 525-528.

[35] 管彦武. 基于 GIS 的青藏高原地热资源信息系统研究[D]. 长春:吉林大学,2007.
Guan Yan-wu. Study on the Geothermal Information System of Tibetan Plateau Based on GIS [D]. Changchun: Jilin University, 2007.

[36] 肖根如,甘卫军,陈为涛,等. 青藏高原班公—怒江缝合带现今运动状况的 GPS 观测研究[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2010, 40(6):1496-1502.
Xiao Gen-ru, Gan Wei-jun, Chen Wei-tao, et al. Present-Day Movement of Bangong-Nujiang Suture Zone, Tibetan Plateau, Inferred from GPS Measurements[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40(6): 1496-1502.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net