

· 研究进展 ·

青藏高原中北部地壳流动与高原扩展： 来自火山岩的证据

王强^{1, 2*} 苟国宁¹ 张修政¹ 但卫¹ 唐功建¹ 马林¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640;

2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

[摘要] 地球物理探测已清楚地揭示出青藏高原地壳 15—50 km 深处低速高导层的存在, 但其成因一直存在争议。通过对青藏高原中北部上新世-第四纪(4.7—0.3 Ma)长英质火山岩的研究揭示出, 高原低速高导层是地壳熔体的源区。这为熔体弱化的地壳流动导致青藏高原向北、向东扩展提供了重要的岩石学证据。

[关键词] 火山岩; 上新世-第四纪; 地壳熔融; 地壳流动; 低速高导层; 青藏高原

DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.2017.02.004

青藏高原是世界上最大、最高的新生代高原, 其高(平均近 4 000—5 000 m)的海拔、巨厚(~50—90 km)的地壳和宽广(超过 250 km²)的面积吸引了众多研究者的关注。三种主要的机制被用于解释其地壳增厚过程和高海拔地形或宽广面积的形成: 挤压增厚^[1,2]、地幔岩石圈的减薄^[3,4]和地壳流动(或通道或隧道流(channel flow))^[5-7]。前两种机制主要与岩石圈地幔的组成、结构和热状态密切相关^[1-4,8-9], 后一种机制主要与中下地壳的组成、结构和热状态密切相关^[5,7,10-12]。本文主要介绍我们近年来在青藏高原中北部地壳流动与高原扩展方面所取得的一些初步的进展。

1 青藏高原中北部地壳流动与低速高导层

地壳流动模型, 就是假设中下地壳中有地壳薄弱层的存在而导致中下地壳的强度降低。当有地壳高度差存在的时候, 地壳薄弱层上下界面的压力差将触发地壳薄弱层发生流动^[5-6]。青藏高原的地壳流动包括两种形式: (1) 通道流: 部分熔融的拉萨地块中地壳向南挤出, 导致了高喜马拉雅的隆升^[6,12-13]; (2) 下地壳流动: 青藏高原中南部地壳增厚, 弱化的下地壳向北、东流动导致了青藏高原向北、东的生长^[7,10-11]。

近 20 多年来, 青藏高原地球物理学探测的一个极其重要的进展, 就是在青藏高原的地壳深处(15—50 km)发现有低速高导层^[13-26]。该低速层的剪切波(S)波速的波动幅度(V_s 波动(perturbation))界于-12—0, 暗示绝大部分青藏高原的 S 波波速(V_s)在 15—50 km 小于 < 3.4 km/s^[23,27]。但是, 该低速层 S 波波速的波动幅度最明显的负值(-12~-6)和最小的 S 波波速(V_s) ($V_s < 3.35$ 或 3.25 km/s)出现在青藏高原中北部^[23,26-27]。大地电磁资料也显示最小的电阻率出现在青藏高原北部羌塘下部的中地壳中^[15,17,19,22,28]。尽管地球物理资料已经清楚地揭示了青藏高原低速高导层的存在, 但其成因一直存在争议, 可能的影响因素包括地壳剪切带^[2,29]、云母晶体的优选定向^[30]、含水流体^[19]或地幔熔体^[15]等。基于深熔熔体、数值模拟、大地电磁和地震的证据, 地壳通道流模型认为青藏高原的这些低速高导层为地壳内的部分熔融层, 这也是青藏高原地壳流动模型的理论基础^[12-13,18,22-23,25,26,28,31-32]。

有关低速-高导层的争议表明, 如果要揭示其特征和起源, 就必须要有来自深部地壳岩石样品的直接证据。来自深部地壳或上地幔的火山岩及包体为揭示青藏高原深部地壳、地幔热状态提供了重要信息。基于青藏高原中部羌塘地区新生代火山岩中地

收稿日期: 2016-08-08; 修回日期: 2016-09-02

* 通信作者, Email: wqiang@gig.ac.cn

壳麻粒岩包体和有限的地震波速资料,前人认为青藏高原中下地壳太干而不可能发生地壳熔融^[33]。这导致一些研究者对地壳流动导致高原生长的模型产生了强烈质疑^[2,34],特别是在青藏高原中北部,这种质疑更多^[35]。

2 青藏高原中北部上新世-第四纪长英质火山岩的分布与成因

青藏高原包括喜马拉雅、拉萨、羌塘和松潘-甘孜-昆仑等地块,这些地块上都有新生代岩浆岩,但上新世-第四纪岩浆岩分布并不多:(1)在喜马拉雅地块中,仅仅在巴基斯坦北部在南迦帕尔巴特峰发现有极其少量更新世(1.7—1.0 Ma)的混合岩和淡色花岗岩的脉体^[36];(2)在拉萨地块缺少晚中新世(~9.0 Ma)以来的新生代岩浆岩;(3)羌塘地块东西部地区岩浆岩时空分布不同,在东部(青藏公路以东)的三江地区,存在一些上新世-第四纪的岩浆岩^[37—39];在羌塘中西部(青藏公路以东)地区,仅仅在赤布张错-多格错仁一带(如东月湖、恒梁湖、乌兰乌拉湖以及赤布张错等)出现一些上新世-第四纪(5.0—2.3 Ma)钙碱性火长英质火山岩^[26,33,40];(4)松潘-甘孜-昆仑地块主要在中、西昆仑出露有上新世到第四纪(4.0—0.07 Ma)的钙碱性-钾质碱性火山岩和少量侵入岩^[4,26,32,41—49],其中在青藏高原北缘可能存在一条东西向上新世-第四纪(4.0—0.3 Ma)长英质岩浆岩带^[26,32]。

我们最近对青藏高原中北部羌塘和松潘-甘孜-中

昆仑上新世-第四纪(4.7—0.3 Ma)长英质岩浆岩开展了研究^[26,32]。在中北部羌塘地区,火山岩主要由英安岩和少量粗安岩、流纹岩组成;在松潘-甘孜-中昆仑地块,火山岩主要由黑云母或二云母流纹岩和少量粗安岩组成。这些岩石主要为高钾钙碱性,少量为橄榄玄粗质,具有高的 SiO₂ (58—76 wt. %)、低的 MgO (2.67—0.0 wt. %) 和 Mg# (<45),并富集轻稀土元素,亏损重稀土元素以及负 Nb 和正 Pb 异常。根据其岩性和地球化学特征^[26,32],大致可以将上述岩石分成四种类型(图 1):

(1) 高温的(锆石饱和温度 $T_{zr} = 896—983\text{ }^{\circ}\text{C}$) 英安岩和粗安岩,主要分布于中北部羌塘地块,零星分布于松潘-甘孜-中昆仑地块,具有略微负 Sr 和 Eu 异常,岩石来自于含石榴石、斜长石的麻粒岩相岩石在 0.8—1.5 GPa 压力(相当于 26—50 km 深度)条件下熔融形成;

(2) 低温($T_{zr} = 700—844\text{ }^{\circ}\text{C}$) 强过铝质流纹岩,仅仅分布于松潘-甘孜-中昆仑地块,具有明显的负 Sr 和 Eu 异常,为含石榴石、斜长石的变质沉积岩在 0.5—1.2 GPa 的压力(相当于 15—40 km 深度)的条件下熔融形成;

(3) 低温($T_{zr} = 741—825\text{ }^{\circ}\text{C}$) 埃达克质粗安岩,仅仅分布于松潘-甘孜-中昆仑地块北缘,无明显 Sr 和 Eu 异常,为含石榴石+金红石和很少或没有斜长石的榴辉岩质岩石在 >1.2—1.5 GPa (相当于 40—50 km 深度)条件下熔融形成;

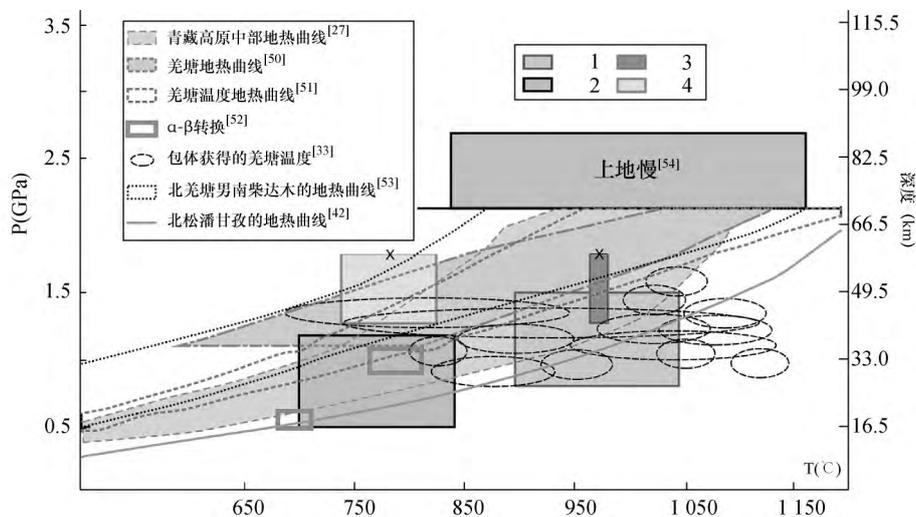


图 1 青藏高原中北部的地壳热状态^[26]

岩浆产生的温压范围:1-松潘-甘孜-昆仑第四纪(1.08—0.3 Ma)非埃达克质粗安岩和中北部羌塘上新世-第四纪(4.7—2.3 Ma)非埃达克质长英质火山岩;2-松潘-甘孜-昆仑上新世-第四纪(4.0—1.5 Ma)流纹岩;3-中北部羌塘恒梁湖地区上新世(3.2—2.5 Ma)埃达克质流纹岩;4-中昆仑摘星山上上新世(2.97 Ma)埃达克质粗安岩。

(4) 高温 ($T_r = 968 - 983\text{ }^\circ\text{C}$) 埃达克质流纹岩, 仅仅分布于羌塘中北部, 无明显 Sr 和 Eu 异常, 为含石榴石+金红石和很少或没有斜长石的榴辉质岩石在 $>1.2 - 1.5\text{ GPa}$ (相当于 40—50 km 深度) 条件下熔融形成。

因此, 青藏高原中北部上新世-第四纪的长英质岩浆由地壳岩石在 $700 - 1050\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度和 $0.5 - 1.5\text{ GPa}$ (相当于 15—50 km 深处) 的压力条件下熔融形成^[26,32]。上述岩浆产生的温压条件与目前基于地球物理、地壳包体和地球物理与岩石学模拟研究得出的青藏高原中北部现今的地温曲线一致 (图 1), 显示青藏高原中北部中下地壳中现今的地热梯度很有可能导致岩石发生高温熔融^[26]。

3 对青藏高原中北部低速高导层的启示

青藏高原中北部地壳熔融形成的上新世-第四纪 (4.7—0.3 Ma) 长英质火山岩为高原内部的低速高导层提供了新的证据 (图 2)。低速高导层出现在 15—50 km 的深度, 相似于上新世-第四纪地壳熔融产生的岩浆的深度 (图 2b)。而且, 这些长英质岩浆被限制在 S 波波速的波动幅度最明显的负值 ($-12 \sim -6$) 和最小的 S 波波速 (V_s) ($V_s < 3.35$ 或 3.25 km/s) 区域 (图 2b)^[23,26-27]。这些结果与部分熔融岩石的地震性质的实验和模拟计算结果一致: 青藏高原地壳深处的电导和地震异常最好由部分熔融岩石的出现来解释^[27-28,55-56]。

简单批次熔融模拟计算显示, 青藏高原中北部地壳熔体来自地壳岩石 8%—22% 的熔融^[26]。这个熔体分数与大地电磁^[18,20,28] 和熔融与模拟实验^[55-56] 研究揭示出的青藏高原的地壳低速高导层形成所需要的熔体分数 ($\sim 23\%$ 和 $8\% - 23\%$) 非常一致。这表明, $\sim 10\% - 20\%$ 的地壳熔体现在出现在低速高导层中, 并且相似的部分熔融程度需要产生 4.7—0.3 Ma 的长英质火山岩。因此, 上述研究为低速高导层是地壳熔体的源区提供了新的岩石学证据^[26]。这也暗示, 至少在 $\sim 5\text{ Ma}$ 开始, 在青藏高原中北部中下地壳的熔融状态对构造活动十分有利^[26]。

4 对青藏高原向北、向东扩展的意义

3 种主要的机制被用于解释青藏高原的地壳增厚过程和高海拔地形或宽广面积的形成: 挤压增厚、地幔岩石圈的减薄和地壳流动 (或通道或隧道流)。前两个机制主要出现在青藏高原相对早期的演化阶

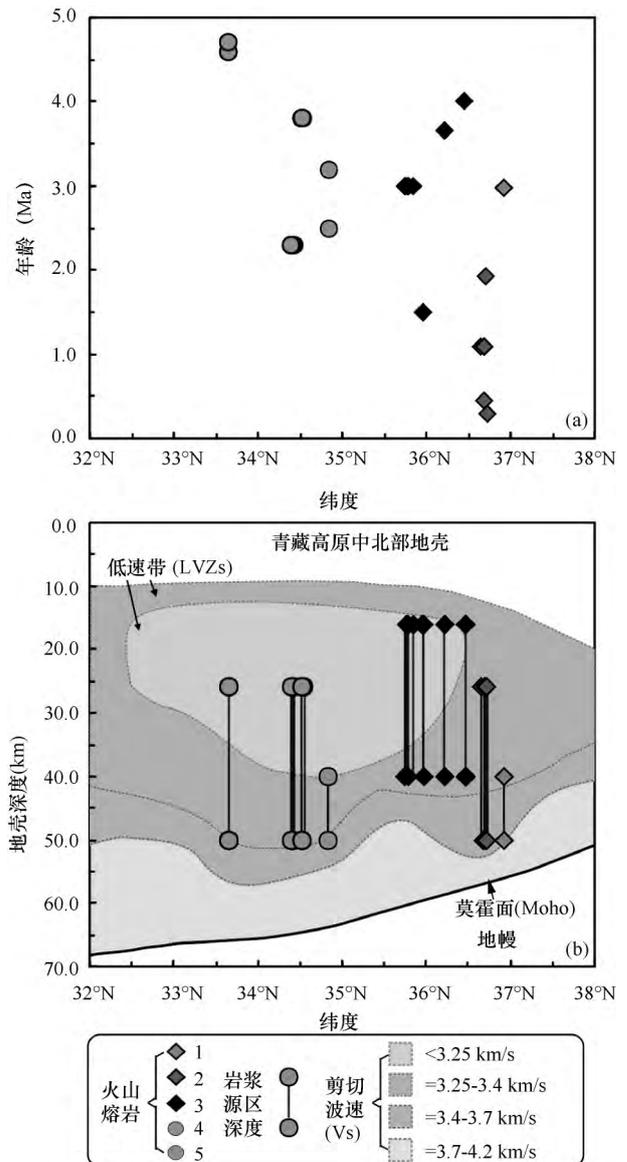


图 2 青藏高原中北部上新世-第四纪 (4.7—0.3 Ma) 岩浆特征与纬度变化图解^[26]

(a) 火山岩年龄与纬度变化图; (b) 岩浆来源深度与纬度变化图。1-中昆仑摘星山上新世 (2.97 Ma) 埃达克质粗安岩; 2-松潘-甘孜-昆仑第四纪 (1.08—0.3 Ma) 非埃达克质粗安岩; 3-松潘-甘孜-昆仑上新世-第四纪 (4.0—1.5 Ma) 流纹岩; 4-中北部羌塘上新世-第四纪 (4.7—2.3 Ma) 非埃达克质长英质火山岩; 5-中北部羌塘恒梁湖地区上新世 (3.2—2.5 Ma) 埃达克质流纹岩。

段^[14,26,32], 或在青藏高原的边缘 (如在西昆仑北部^[57] 或祁连地区^[1-2] 的地壳脆性增厚)。地壳流动很可能出现在印度-欧亚板块汇聚多导致的晚期加热乃至熔融阶段^[14,26,32]。而且, 地壳流动需要一个薄弱地壳层, 其粘度小于上下层的岩石, 其有效粘度要低于一个绝对阈值 (absolute threshold)^[6,12,18]。在重新评估了部分熔融岩石的变形实验资料后,

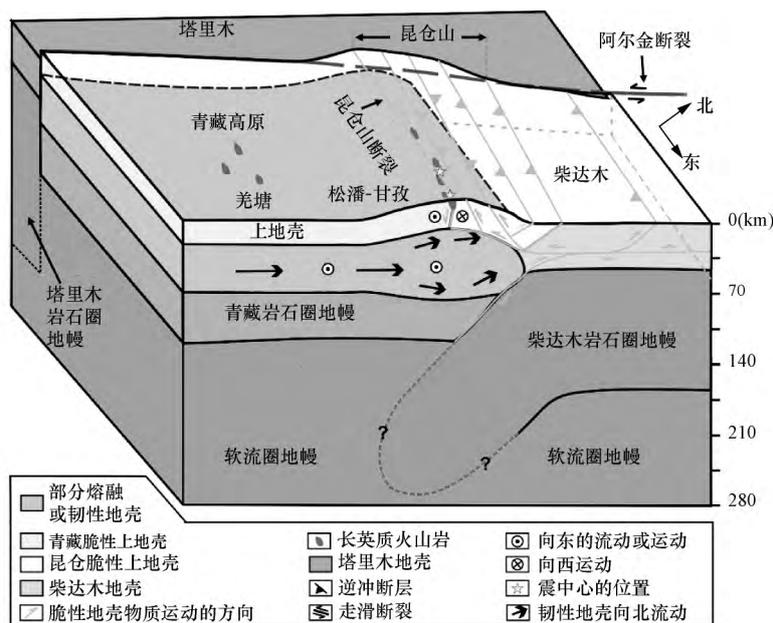


图3 导致沿青藏高原北部边缘地壳熔融、地壳增厚、地震和表面隆升的地壳流动模型^[32]

Rosenberg 和 Handy^[58]将 $\sim 7 \text{ vol}\%$ 熔体分数作为熔体连通的转变值(melt connectivity transition, MCT)。该转变值指示熔体内部连通性的增长将导致岩石强度快速降低^[58]。因此,如大地电磁、熔融实验以及上新世-第四纪长英质火山岩所暗示的,如果青藏高原中北部羌塘和松潘-甘孜-昆仑地区中下地壳中存在 $\sim 10\%—20\%$ 熔体^[20,26,28,55—56],那么在该区中下地壳的强度将会被明显改变^[56,58]。这将使得熔体弱化的青藏高原中北部中下地壳向北和向东流动非常有利^[16,20,22,25—26,28,32,59—62]。

卫星雷达干涉测量(InSAR)和全球定位系统(GPS)观测资料显示,青藏高原不具有板块构造那种刚性特征,而是像“流体”或“油灰”一样正发生塑性或连续变形^[63—66]。甚至有学者认为,青藏高原的隆升不同于板块构造过程,是一个正在进行的大陆构造过程^[64,67]。为什么会这样?我们认为,一个很重要的原因,就是青藏高原岩石圈特别是中北部的中下地壳为高温的且呈部分熔融状态,这导致青藏高原象“流体”或“油灰”一样发生塑性或连续变形。而且,在青藏高原中北部高温的、部分熔融的中下地壳中,地壳熔体强化的韧性流动过程也使得高原内部莫霍面变得平坦^[14,32]、或在地表高海拔处诱发正断层作用(图3)^[32],从而导致中北部高原内部能够保持较为一致的平坦表面地形^[14,26,31—32]。

另外,青藏高原中北部上新世-第四纪长英质火山岩向北有逐渐变年轻的趋势(图2a),暗示了地壳向北的流动^[26]。我们提出,在青藏高原中北部,中下地壳向北、向东流流动,也触发高原的向北、向东生长和高原北部、东部地震(如2001年的可可西里、2008年的汶川、2008年和2014年的于田、2010年的玉树、2013年的雅安以及2015年的皮山地震等等)的频繁发生(图3)^[26,32,28,59—61,68]。数值模拟研究也揭示,碰撞造山带在早期形成的可能是线性的造山带,但到晚期由于地壳的熔融导致的地壳流动将形成宽广的高原^[31]。因此,同样是陆-陆碰撞形成的造山带,阿尔卑斯山地区由于岩石圈温度低、地壳熔融不明显,只形成了线性造山带^[31],但是喜马拉雅-青藏高原岩石圈高热的中下地壳触发了广泛的地壳熔融,并诱发了地壳流动,导致造山带向四周扩展并形成了宽广的高原^[26,31—32]。

致谢 本文工作得到了国家杰出青年科学基金项目(41025006)、国家自然科学基金重点项目(41630208)、国家重点研发计划课题(2016YFC0600407)、中国科学院先导专项(XDB03010600)、广东省人才项目(2014TX01Z079)和广州地化所“135”项目(135TP201601)的资助。

参 考 文 献

- [1] Yin A, Harrison TM. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogeny. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 2000, 28: 211—280.
- [2] Tapponnier P, Xu Z, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 2001, 294: 1671—1677.
- [3] Molnar P, England P, Martinod J. Mantle dynamics, the uplift of the Tibetan plateau, and the Indian monsoon. *Review of Geophysics*, 1993, 31: 357—396.
- [4] Turner S, Hawkesworth S, Liu J, et al. Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks. *Nature*, 1993, 364: 50—54.
- [5] Bird, P. 1991. Lateral extrusion of lower crust from under high topography in the isostatic limit. *Journal of Geophysical Research*, 96: 10275—10286.
- [6] Grujic D, Casey M, Davidson C, et al. Ductile extrusion of the Higher Himalayan Crystalline in Bhutan: evidence from quartz microfabrics. *Tectonophysics*, 1996, 260: 21—44.
- [7] Royden LH, Burchfiel BC, King RW, et al. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 1997, 276: 788—790.
- [8] Ding L, Kapp P, Zhong D, et al. Cenozoic volcanic rocks in Tibet: Evidence for a transition from Oceanic to Continental subduction. *Journal of Petrology*, 2003, 44: 1833—1865.
- [9] 吴福元, 黄宝春, 叶凯, 等. 喜马拉雅造山带的垮塌与青藏高原的隆升. *岩石学报*, 2008, 24(1): 1—30.
- [10] Royden LH, Burchfiel BC, van der Hilst RD. The Geological Evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 2008, 321: 1054—1058.
- [11] Clark MK, House MA, Royden LH, et al. Late Cenozoic uplift of southeastern Tibet. *Geology*, 2005, 33 (6): 525—528.
- [12] Beaumont C, Jamieson RA, Nguyen MH, et al. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. *Nature*, 2001, 414: 738—742.
- [13] Nelson KD, Zhao WJ, Brown LD, et al. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Synthesis of project INDEPTH results. *Science*, 1996, 274: 1684—1688.
- [14] Owens TJ, Zandt G. Implications of crustal property variations for models of Tibetan plateau evolution. *Nature*, 1997, 387: 37—43.
- [15] Wei WB, Unsworth M, Jones A, et al. Detection of wide-spread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies. *Science*, 2001, 292: 716—718.
- [16] Wei WB, Le Pape F, Jones AG, et al. Northward channel flow in northern Tibet revealed from 3D magnetotelluric modeling. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2014, 235: 13—24.
- [17] Unsworth M, Wei W, Jones AG, et al. Crustal and upper mantle structure of northern Tibet imaged with magnetotelluric data. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: B02403.
- [18] Unsworth MJ, Jones AG, Wei W, et al. Crustal rheology of the Himalaya and Southern Tibet inferred from magnetotelluric data. *Nature*, 2005, 438: 78—81.
- [19] Klemperer SL. Crustal flow in Tibet: geophysical evidence for the physical state of Tibetan lithosphere, and inferred patterns of active flow. Geological Society, London; Special Publications, 2006, 268: 39—70.
- [20] Bai D, Unsworth MJ, Meju MA, et al. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 358—362.
- [21] Fu YV, Li A, Chen YJ. Crustal and upper mantle structure of southeast Tibet from Rayleigh wave tomography. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(B12): B12323.
- [22] Le Pape F, Jones AG, Vozar J, et al. Penetration of crustal melt beyond the Kunlun Fault into northern Tibet. *Nature Geoscience*, 2012, 5: 330—335.
- [23] Yang Y, Ritzwoller MH, Zheng Y, et al. A synoptic view of the distribution and connectivity of the mid-crustal low velocity zone beneath Tibet. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(B4): B04303.
- [24] Zhao LF, Xie XB, He JK, et al. Crustal flow pattern beneath the Tibetan Plateau constrained by regional Lg-wave Q tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 383(0): 113—122.
- [25] Jiang C, Yang Y, Zheng Y. Penetration of mid-crustal low velocity zone across the Kunlun Fault in the NE Tibetan Plateau revealed by ambient noise tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 406: 81—92.
- [26] Wang Q, Hawkesworth CJ, Wyman D, et al. Pliocene-Quaternary crustal melting in central and northern Tibet and insights into crustal flow. *Nature Communications*, 2016, 7: 11888.
- [27] Hacker BR, Ritzwoller MH, Xie J. Central Tibet has a partially melted, Mica-Bearing Crust. *Tectonics*, 2014, 33: 1408—1424.
- [28] Le Pape F, Jones AG, Unsworth MJ, et al. Constraints on the evolution of crustal flow beneath Northern Tibet. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16: 4237—4260.
- [29] Wittlinger G, Tapponnier P, Poupinet G, et al. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along the Altyn Tagh fault. *Science*, 1998, 282: 74—76.
- [30] Shapiro NM, Ritzwoller MH, Molnar P, et al. Thinning and flow of Tibetan crust constrained by seismic anisotropy. *Science*, 2004, 305: 233—236.
- [31] Jamieson RA, Unsworth MJ, Harris NBW, et al. Crustal Melting and the flow of Mountains. *Elements*, 2011, 7(4): 253—260.
- [32] Wang Q, Chung SL, Li XH, et al. Crustal melting and flow beneath northern Tibet: Evidence from Mid-Miocene to Quaternary strongly peraluminous rhyolites in southern Kunlun Range. *Journal of Petrology*, 2012, 53(12): 2523—2566.
- [33] Hacker BR, Gnos E, Ratschbacher L, et al. Hot and dry deep crustal xenoliths from Tibet. *Science*, 2000, 287: 2463—2466.
- [34] Nábelek J, Hetényi G, Vergne J, et al. Underplating in the Himalaya-Tibet Collision Zone Revealed by the Hi-CLIMB Experiment. *Science*, 2009, 325: 1371—1374.
- [35] Searle MP, Law RD, Jessup MJ. Crustal structure, restoration and evolution of the Greater Himalaya in Nepal-South Tibet: implications for channel flow and ductile extrusion of the middle crust. Geological Society, London, Special Publications, 2006, 268(1): 355—378.

- [36] Crowley JL, Waters DJ, Searle MP, et al. Pleistocene melting and rapid exhumation of the Nanga Parbat massif, Pakistan: Age and P-T conditions of accessory mineral growth in migmatite and leucogranite. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 288(3-4): 408-420.
- [37] Wang JH, Yin A, Harrison TM, et al. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 188: 123-133.
- [38] Zhou MF, Robinson PT, Wang CY, et al. Heterogeneous mantle source and magma differentiation of Quaternary arc-like volcanic rocks from Tengchong, SE margin of the Tibetan Plateau. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2012, 163: 841-860.
- [39] Zou H, Fan Q, Schmitt AK, et al. U-Th dating of zircons from Holocene potassic andesites (Maanshan volcano, Tengchong, SE Tibetan Plateau) by depth profiling: Time scales and nature of magma storage. *Lithos*, 2010, 118(1-2): 202-210.
- [40] 魏君奇, 姚华舟, 王建雄, 等. 长江源区新生代火山岩的年代学研究. *中国地质*, 2004, 31(4): 390-394.
- [41] Burchfiel BC, Molnar P, Zhao Z, et al. Geology of the Ulugh Muztagh area, northern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 1989, 94: 57-70.
- [42] McKenna LW, Walker JD. Geochemistry of crustally derived leucocratic igneous rocks from the Ulugh Muztagh area, northern Tibet and their implications for the formation of the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95: 21483-21502.
- [43] 邓万明. 青藏高原北部新生代板内火山岩. 北京:地质出版社, 1998: 1-180.
- [44] 刘嘉麒. 中国火山. 科学出版社, 1999: 1-219.
- [45] Cooper KM, Reid MR, Dunbar NW, et al. Origin of mafic magmas beneath northwestern Tibet: Constraints from ^{230}Th - ^{238}U disequilibria. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2002, 3(11): 1-23.
- [46] Chung SL, Chu MF, Zhang Y, et al. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. *Earth-Science Reviews*, 2005, 68: 173-196.
- [47] Guo Z, Wilson M, Liu J, et al. Post-collisional, Potassic and Ultrapotassic Magmatism of the Northern Tibetan Plateau: Constraints on Characteristics of the Mantle Source, Geodynamic Setting and Uplift Mechanisms. *Journal of Petrology*, 2006, 47: 1177-1220.
- [48] 莫宣学, 赵志丹, 喻学惠, 等. 青藏高原新生代碰撞-后碰撞火成岩. 北京:地质出版社, 2009: 1-396.
- [49] 赵振明, 计文化, 李荣社, 等. 青藏高原北部巴颜喀拉与东昆仑地区新近纪以来火山岩的地球化学特征及其成因. *地球化学*, 2009, 38(3): 205-230.
- [50] Galvé A, Jiang M, Hirn A, et al. Explosion seismic P and S velocity and attenuation constraints on the lower crust of the North-Central Tibetan Plateau, and comparison with the Tethyan Himalayas: Implications on composition, mineralogy, temperature, and tectonic evolution. *Tectonophysics*, 2006, 412: 141-157.
- [51] Vozar J, Jones AG, Fullea J, et al. Integrated geophysical-petrological modeling of lithosphere-asthenosphere boundary in central Tibet using electromagnetic and seismic data: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15: 3965-3988.
- [52] Mechie J, Sobolev SV, Ratschbacher L, et al. Precise temperature estimation in the Tibetan crust from seismic detection of the α - β quartz transition. *Geology*, 2004, 32: 601-604.
- [53] Jiménez-Munt I, Fernández M, Vergés J, et al. Lithosphere structure underneath the Tibetan Plateau inferred from elevation, gravity and geoid anomalies. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 267: 276-289.
- [54] McNamara DE, Walter WR, Owens TJ, et al. Upper mantle velocity structure beneath the Tibetan plateau from Pn travel time tomography. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 493-505.
- [55] Schilling FR, Partzsch GM. Quantifying partial melt fraction in the crust beneath the central Andes and the Tibetan plateau. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26(4-5): 239-246.
- [56] Hashim L, Gaillard F, Champallier R, et al. Experimental assessment of the relationships between electrical resistivity, crustal melting and strain localization beneath the Himalayan-Tibetan Belt. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 373(0): 20-30.
- [57] Jiang XD, Li ZX. Seismic reflection data support episodic and simultaneous growth of the Tibetan Plateau since 25 Myr. *Nature Communications*, 2014, 5: 5453.
- [58] Rosenberg CL, Handy MR. Experimental deformation of partially melted granite revisited: implications for the continental crust. *Journal of Metamorphic Geology*, 2005, 23: 19-28.
- [59] Burchfiel BC, Royden LH, van der Hilst RD, et al. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China. *GSA Today*, 2008, 18: 4-11.
- [60] Karplus MS, Zhao W, Klempner SL, et al. Injection of Tibetan crust beneath the south Qaidam Basin: Evidence from INDEPTH IV wide-angle seismic data. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(B7): B07301.
- [61] Liu QY, Van Der Hilst RD, Li Y, et al. Eastward expansion of the Tibetan Plateau by crustal flow and strain partitioning across faults. *Nature Geoscience*, 2014, 7(5): 361-365.
- [62] Yin A, Dang YQ, Zhang M, et al. Cenozoic tectonic evolution of the Qaidam basin and its surrounding regions (Part 3): Structural geology, sedimentation, and regional tectonic reconstruction. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, 120(7-8): 847-876.
- [63] Wang Q, Zhang PZ, Jeffrey TF, et al. Present-day crustal deformation in continental China constrained by Global Positioning System measurements. *Science*, 2001, 294: 574-577.
- [64] Kerr RA. Hammered by India, Puttylike Tibet Shows Limits of Plate Tectonics. *Science*, 2004, 305(5681): 161.
- [65] Wright TJ, Parsons B, England PC, et al. InSAR Observations of Low Slip Rates on the Major Faults of Western Tibet. *Science*, 2004, 305(5681): 236-239.
- [66] Zhang PZ, Shen ZK, Burgman R, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau constrained from Global Positioning measurements. *Geology*, 2004, 32(9): 809-812.
- [67] Molnar P. Continental tectonics in the aftermath of plate tectonics. *Nature*, 1988, 335: 131-137.
- [68] Wang E, Kirby E, Furlong KP, et al. Two-phase growth of high topography in eastern Tibet during the Cenozoic. *Nature Geoscience*, 2012, 5(9): 640-645.

Crustal flow and plateau expansion in central and northern Tibet: evidence from volcanic lavas

Wang Qiang^{1,2} Gou Guoning¹ Zhang Xiuzheng¹ Dan Wei¹ Tang Gongjian¹ Ma Lin¹

(1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640; 2. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences (CETES), Beijing 100101)

Abstract Geophysical studies exhibit that the low velocity-high conductivity zones (LV-HCZs) occur in the depths of 15—50 km within the Tibetan crust. However, its genesis remains highly contentious. The studies on felsic volcanic lavas erupted Pliocene-Quaternary (4.7—0.3 Ma) in central and northern Tibet suggest that the LV-HCZs are sources of partial melt. This provides important petrogenetic evidence that melt-weakened crustal flow triggered the northward and eastward expansion for the Tibetan Plateau.

Key Words volcanic lavas; Pliocene-Quaternary; crustal melting; crustal flow; low-velocity-high-conductivity zones; the Tibetan Plateau

· 资料信息 ·

DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.2017.02.005

我国学者对中国血流感染致病细菌携带耐多黏菌素基因 *mcr-1* 分子流行病学研究取得重要成果

在国家自然科学基金项目(项目编号:81101285)等资助下,浙江大学俞云松教授研究团队与其领导的全国临床和微生物协作网,通过对携带 *mcr-1* 基因的质粒生物信息学分析,明确了 *mcr-1* 基因的传播机制,临床资料显示 *mcr-1* 阳性菌株目前没有对感染病人的预后造成影响。研究成果以“Prevalence of *mcr-1* in *Escherichia coli* and *Klebsiella pneumoniae* recovered from blood stream infections in China: a multicentre longitudinal study”(中国血流感染大肠埃希菌和肺炎克雷伯菌 *mcr-1* 基因流行情况:多中心纵向研究)为题于 2017 年 1 月 27 日在国际著名医学科学期刊 *The Lancet • Infectious Diseases* 杂志上在线发表。

我国学者于 2015 年首先发现质粒介导的多黏菌素耐药新基因 *mcr-1*, *mcr-1* 基因在动物肠道大肠杆菌中携带率非常高,并在动物与人之间传播。为明确 *mcr-1* 基因在我国临床感染病人分离菌中的分布、多黏菌素耐药性水平、携带 *mcr-1* 质粒的分子流行病学特征及其对感染病人治疗选择和预后的影响,俞云松研究团队开展了大范围、大样本量的临床感染病例研究,从 2066 株临床重要感染类型——血流感染致病菌大肠埃希菌和肺炎克雷伯菌中筛选多黏菌素耐药株和 *mcr-1* 基因阳性菌株。研究共获得 21 株 *mcr-1* 阳性菌株。研究团队利用常规细菌学药敏实验、分子分型、临床数据统计分析等手段,并通过印迹杂交技术和三代测序等技术,对 *mcr-1* 基因的分布、基因定位、传播机制以及对临床预后影响进行了系统研究。

研究结果显示,从我国临床血流感染病人分离的大肠埃希菌和肺炎克雷伯菌 *mcr-1* 基因阳性分离株少、散发。引起的患者中多黏菌素的耐药率为 1.3%,其中大肠埃希菌为 1.5%,肺炎克雷伯菌为 0.7%;而 *mcr-1* 基因的检出率为 1.0%,其中大肠埃希菌为 1.3%,肺炎克雷伯菌为 0.2%。大肠埃希菌是 *mcr-1* 基因的主要宿主。*mcr-1* 基因往往导致低水平的多黏菌素耐药(最低抑菌浓度主要在 4—16 mg/L 范围),且绝大部分携带 *mcr-1* 基因的菌株对许多其他类型的抗菌药物保持敏感。只有 5 株 *mcr-1* 阳性菌株同时携带 CTX-M 型超广谱 β 内酰胺酶,有 1 株 *mcr-1* 阳性菌株同时携带碳青霉烯酶基因 *bla*_{NDM-5},但是与 *mcr-1* 基因不在同一个质粒上。

The Lancet • Infectious Diseases 杂志对本成果专门发表了评论,高度评价了俞云松团队对于血流感染菌株 *mcr-1* 基因流行情况研究的意义;并据此认为中国目前所担忧的碳青霉烯和多黏菌素(*mcr-1* 介导)同时耐药的“末日”尚未到来。

(供稿:医学科学部 冀豆 霍名赫 闫章才)