

青藏高原东南地区地壳物性结构特征*

刘宏兵 孔祥儒 马晓冰 王谦身 闫永利 闫雅芬 杨志强

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101)

摘要 研究结果表明青藏高原各块体和断裂带的地壳深部物性特征有明显的差异, 在横向和纵向具有明显的下不均匀性, 冈底斯块体尤为突出. 由于受印度大陆的挤压, 壳内高导层在冈底斯块体中向北倾, 且不连续. 但在羌塘和巴颜喀拉块体中基本上呈水平分布, 且较厚. 金沙江断裂带在玉树附近向北倾斜, 澜沧江断裂和怒江断裂带基本上呈垂直分布. 重力布格异常南北两端较高, 高原内部较低, 察隅-沙马尚未达到重力均衡, 呈明显的负异常, 表明该地区正处在快速隆升的阶段. 此外在不同的块体内和断裂带上, 地磁异常的变化十分明显, 由南向北磁异常的强度和变化幅度明显地减弱. 各种地球物理方法的观测与研究, 从不同的侧面反映出了研究区域内块体和断裂的空间展布特征.

关键词 地球物理探测 地壳电性分布 重力异常和地磁异常 地壳结构

为探索青藏高原岩石圈的深部结构及其形成、演化的过程, 中外地质和地球物理学家在青藏高原的一些关键地区, 如高原内部深大断裂带、南北构造边界等进行了长期的观察和研究. 研究表明在不同的区域和不同壳、幔深处, 青藏高原结构表现出明显差异^[1-3].

青藏高原东南部地区处于欧亚板块和印度板块的结合带, 汇集了巴颜喀拉、羌塘、冈底斯、喜马拉雅块体和金沙江、澜沧江及怒江断裂带, 是探讨高原隆升、演化和深部物质东流的重要地区. 以往, 在青藏东南地区开展过一些地球物理探测工作, 但深部地球物理探测较少, 我们期望通过这项工作获得该地区重、磁及电性的深部结构, 并了解高原形成过程中的动力学背景.

地球物理观察剖面北起青海玛多县, 向南经过玉树、昌都, 横跨金沙江、澜沧江、怒江断裂带及横断山脉到察隅的沙马, 直线距离约 760 km. 沿剖面进行了大地电磁(MT)、重力和地磁观测, 获得大地电磁测点 30 个; 重力、地磁测点各 349 个, 平均点距约 2 km(图版 I, 附本刊后, 下同).

1 大地电磁(MT)测量和电性结构特征

MT 测量的主要目标是探测壳、幔电性结构以及断裂带的深部电性状况, 测线从清水河以北开始, 经玉树、昌都穿过巴颜喀拉、羌塘、冈底斯块体和金沙江、怒江、澜沧江断裂带到藏南察隅的沙马. 沿测线有 30 个 MT 测点(图版 I -1). 文中分别使用一维和二维反演方法计算电阻率的分布, 前者突出电性的平均分布和层状结构, 后者反映地壳和断裂带电性结构的连

2001-02-12 收稿, 2001-07-20 收修稿稿

* 国家重点基础研究发展规划(G1998040800)和中国科学院青藏高原研究(KZ951-A1-204, KZ95T-06)资助项目

续变化特征, 计算结果有很好的—致性。

图版 I-2(a)是利用 BOSTIC 和 MARQUART 方法获得的一维电性结构模型, 反映出地壳内层状电性结构的特点: (1) 在怒江以南的冈底斯块体中地壳内有两个高导层, 上部的高导层较薄, 厚 2~3 km, 电阻率 10~50 $\Omega \cdot m$, 埋深约 6~8 km, 反映了地壳沉积基底的变化; 下部高导层在 20~50 km 深处, 高导层从南端的 20 km 深处向北倾斜, 到怒江带附近深约 50 km. 上部高导层由于浅层构造活动的影响起伏较大, 但也具有南浅北深的特征. 此外, 在 5 号和 10 号测点处高导层有明显的错断, 每个地块的电性结构有较大的差别, 表明冈底斯由 3 个次级构造组成. 在西藏中、西部地区, 冈底斯块体中的高导层南端基本呈水平, 北端北倾^[4,5], 把冈底斯分为南、北两部分. 但在东南地区这种特征不明显, 虽然有断裂切割地壳, 但由南向北是逐渐加深的. (2) 羌塘的电阻率比冈底斯低、高导层的埋深要比冈底斯浅, 在深约 10 和 26 km 处分别存在两个高导层, 基本呈水平分布, 怒江断裂带两侧的高导层有明显的错断, 断距约 10 km. (3) 在巴颜喀拉块体中高导层较厚, 约 8~10 km, 电阻率的值较低, 约为 5 $\Omega \cdot m$.

图版 I-2(b)是采用二维快速松弛反演(RRI)获得的二维的电性结构(图中空白处测量数据不足), 它反映了沿测线地壳内电性结构连续变化的特征. 电性不论在横向还是在纵向上都表现出强烈的不均匀性. 以怒江-澜沧江为界北部地区的羌塘和巴颜喀拉块体中, 壳内电阻率值分布平缓而且较低, 在西藏中部地区电阻率分布也有类似的特征^[6,7]. 在剖面的南部电阻率值相对较高, 而且电性分布结构复杂, 表明藏南构造活动强烈、地质构造复杂. 同时电性分布还反映出金沙江在玉树附近向北倾斜、澜沧江和怒江断裂带基本呈垂直分布. 而且金沙江和澜沧江断裂带上物质的电阻率较高, 怒江断裂的电阻率较低, 反映了断裂带的不同性质.

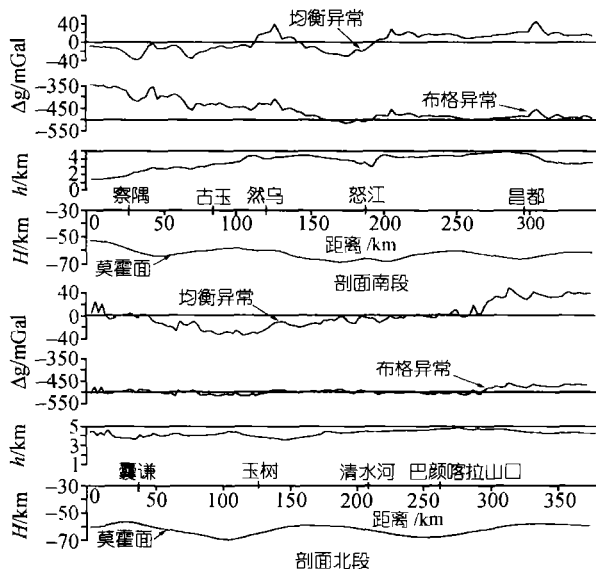


图 1 青藏东南沙马-玛多剖面重力异常值与地壳厚度

由于观测剖面受道路的影响, 南北段走向不一致, 为了便于重力场的计算, 将重力剖面分为北段和南段两部分(图 1), 重力布格异常和均衡异常特征如下:

(i) 剖面北段. 巴颜喀拉山口重力异常变化较大, 以北地区布格重力异常值较高, 约 -470 mGal. 从巴颜喀拉山口到玉树, 布格重力异常值缓慢变化, 从 -520 mGal 逐渐增加到 -490 mGal. 在玉树附近的金沙江断裂带上布格重力异常值变化梯度较大, 过断裂带后进入达马拉山, 重力异常为 -530 mGal. 囊谦-杂作为高重力异常区. 均衡重力异常, 北部果洛地区为正异常, 巴颜喀拉山区、达马拉山区为负异常, 囊谦-杂作地区又转为低正异常分布.

2 重力场特征与地壳莫霍面深度

重力观测剖面北起青海的玛多经巴颜喀拉山和清水河, 斜跨金沙江经玉树、囊谦、班达跨越怒江后, 经八宿、然乌和古玉直到沙马, 测线全长约 760 km, 共有 349 个重力测点(图 1). 由于观测剖面受道路的影响, 南北段走向不一致, 为了便于重力场的计算, 将重力剖面分为北段和南段两部分(图 1), 重力布格异常和均衡异常特征如下:

(i) 剖面北段. 巴颜喀拉山口重力异常变化较大, 以北地区布格重力异常值较高, 约 -470 mGal. 从巴颜喀拉山口到玉树, 布格重力异常值缓慢变化, 从 -520 mGal 逐渐增加到 -490 mGal. 在玉树附近的金沙江断裂带上布格重力异常值变化梯度较大, 过断裂带后进入达马拉山, 重力异常为 -530 mGal. 囊谦-杂作为高重力异常区. 均衡重力异常, 北部果洛地区为正异常, 巴颜喀拉山区、达马拉山区为负异常, 囊谦-杂作地区又转为低正异常分布.

(ii) 剖面南段. 布格重力异常起伏变化较大, 南北相差达 140 mGal. 在横断山脉北延部分, 卡屾-达那卡地区、郭井塘-邦达地区为中、低重力异常区, 约为-490 mGal, 其间, 昌都以南的澜沧江附近重力异常较高, 为-440 mGal. 唐古拉山向东的余脉部分, 怒江、八宿-然乌以北地区为低重力异常区, 为-510 mGal 左右. 然乌附近的重力异常为-420 mGal. 测线南端察隅地区的重力异常高达-350 mGal. 在剖面上, 重力异常变化在澜沧江和怒江断裂带上梯度较大, 在冈底斯中起伏较大, 但在南羌塘中较为平缓. 均衡异常的分布特征为: 怒江以南为正异常区, 巴宿-然乌为负异常区, 察隅表现为强烈的均衡负异常区.

利用重力异常计算得到莫霍界面深度和起伏分布特征(图 1 莫霍面深度曲线): 剖面北段的莫霍界面的起伏与地势的起伏相对应, 巴颜喀拉山以北为 56 km 左右, 巴颜喀拉山区约为 67 km, 清水河-玉树地区为 60 km 左右, 上拉秀附近的达马拉山区为 68 km, 囊谦地区为 58 km. 剖面南段地壳厚度在昌都附近为 60 km 左右, 横断山脉的邦达-巴宿地区厚 65 km 左右, 唐古拉山地区为 66~67 km. 然乌到古玉地区为 56~59 km, 在南端沙马, 莫霍界面陡升到 50 km 左右. 地壳厚度总体分布格局为北部地壳相对较厚、中部地区地壳厚度起伏变化大, 南部变薄.

3 地磁异常特征

地磁测量剖面及测点位置均与重力剖面相同, 每个测点同时进行地磁场总强度和垂向梯度的测量, 共有 349 个测点. 测量数据通过日变改正、长期变化改正和正常场改正后生成反映地壳内物质磁性变化的磁异常曲线(图 2).

沙马-玛多剖面磁异常有 4 个陡变带, 它们分别在沙马与下察隅之间、八宿附近、昌都正西和玉树以北. 其中, 沙马-下察隅之间近 90 nT 极值异常表明存在断裂构造. 昌都正西的极值异常很大, 但垂直异常梯度也很大, 表明极值异常受浅层的高磁性物质影响较大.

磁异常极值很直观地把剖面分割成形态各异的 3 大部分: (1) 沙马-八宿异常区, 该部分磁异常变化强烈; (2) 八宿-玉树异常区, 该区域内磁异常起伏较大, 异常变化相对平缓; (3) 玉树-玛多异常区, 磁异常变化非常平稳. 可见, 玉树以南地壳磁性变化复杂, 特别在八宿-沙马地区. 此外在金沙江、怒江断裂带附近表现为较强、较宽的磁性异常区, 反映了浅层强烈的构造变形和基性岩超基性岩的广泛分布. 巴颜喀拉地区为弱磁区, 与该区域内较厚的沉积覆盖相关.

原始磁异常表现了地壳磁性结构的集合效应, 对异常曲线作圆滑处理和向上延拓计算后,

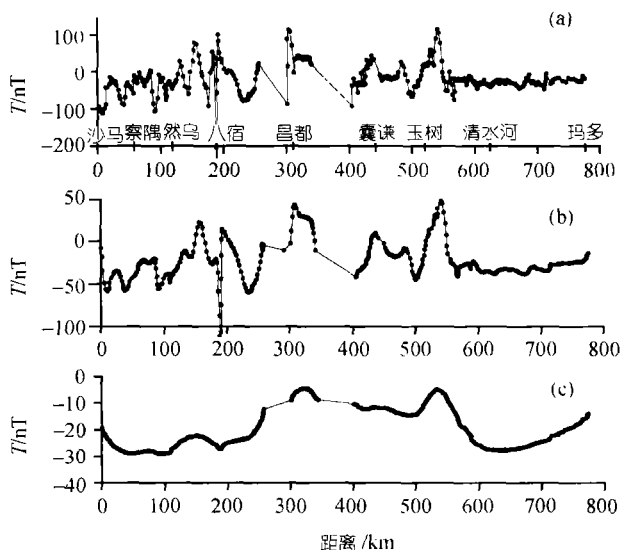


图 2 青藏东南沙马-玛多剖面地磁异常图
(a) 原始磁异常; (b) 向上延拓 5 km 的磁异常; (c) 向上延拓 40 km 的磁异常

上述磁性异常分区的特征依然存在(图 2), 表明深部磁性异常体是造成磁异常的分区特征的主要因素.

4 藏东南地区地壳物性构造特征

综合地球物理数据表明, 地球物理的数据场的特征反映了该地区条、块结构的深部地质构造. 在深大断裂带和不同的块体之间不同的地球物理异常特征均反映了某些共同的特性. 根据重、磁异常和电阻率分布特征, 可对各块体和断裂带的结构特征作如下简要的描述:

巴颜喀拉块体. 重力异常在巴颜喀拉山口附近有明显的变化, 以北异常值为 -450 mGal, 以南为 -500 mGal, 重力反演的地壳厚度约为 $58\sim 60$ km. 地磁异常在块内变化平缓. 在巴颜喀拉山口也有微小的起伏, 这表明巴颜喀拉山口附近有一个明显的块内断裂. 电性结构在金沙江带北侧有明显的变化, 地壳上部主要是高阻的物质. 地壳中有一个较厚的低阻层, 下地壳低阻物质分布广泛. 物性特征反映出地壳的构造变形不显著, 构造活动较弱, 浅层的沉积较厚.

金沙江缝合带. 金沙江的超基性岩带是一条断续分布的蛇绿岩带, 超基性岩体大多成群成带分布. 在玉树和歇武之间, 金沙江断裂带的物性特征明显. 电性梯度带的分布显示金沙江断裂带从玉树向北倾斜, 延伸到地壳的深部, 莫霍面有明显的断距, 高阻物质广泛地分布在断裂带上. 地磁观测还显示金沙江带由一跨度较大的正异常组成, 同时重力异常也表现为低重力异常中的高值. 可见金沙江断裂带主要是由高磁性、高密度的物质组成. 金沙江带从玉树以北开始向北倾斜延伸到地壳深处, 断裂带北侧有大量的基性和超基性侵入.

羌塘块体(东部). 块体位于金沙江和怒江断裂带之间. 物性特征为: 电阻率的梯度变化带分布较为平稳, 羌塘块体和巴颜喀拉块体在电性分布上极为相似. 下地壳的低阻物质分布较广泛($5\sim 20\ \Omega\cdot\text{m}$); 重力布格异常随地形的变化略有变化, 一般在 $-470\sim -490$ mGal 之间, 地壳厚度在 $60\sim 70$ km 之间; 地磁正、负异常相互交替变化, 但变化的幅度要强于巴颜喀拉块体.

班公湖-怒江(东段)与澜沧江缝合带. 两条断裂带在藏南地区相距不远, 前者在八宿附近, 后者在昌都以南. 怒江带表现为负磁异常, 而澜沧江带为正磁异常. 重力异常特征也表现得很明显, 怒江带为相对低的重力异常(断裂带内为 -520 mGal, 两侧为 -470 mGal), 而澜沧江带为相对高的异常(带内为 -450 mGal, 两侧为 -500 mGal). 说明两个构造带的结构有较大的差异, 前者是一个破碎沉积的断裂带, 而后者可能是由基性岩超基性岩侵入而形成的. 大地电磁的 15~19 号测点的电阻率分布显示两个断裂带紧密相连, 物质的电阻率分布有差异, 从怒江带和澜沧江带特征看, 冈底斯块体北倾插入羌塘块体的证据不明显, 两个断裂带基本呈垂直分布.

冈底斯块体. 位于怒江断裂带以南, 冈底斯喜马拉雅期岛弧, 在陆-陆碰撞时期经历了多期的构造变形, 岩浆的活动非常复杂, 有大量的不同期次、不同类型的岩浆岩侵入. 大地电磁结果显示研究区域内的电性结构, 不论纵向还是横向上均表现出强烈的不均匀性, 高导层由南端的 20 km 向北逐步加深到 50 km. 在西藏南部地震震源基本上密集地分布在该深度以上, 可见这是下地壳中的一个重要构造界面. 电阻率的分布还显示在 4 和 10 测点上电阻率较高, 将冈底斯块体分为 3 个次级的单元. 在这两个点附近布格异常也有相应的反映(异常曲线的峰值分别达到 -350 和 -420 mGal), 显然这是由于地壳深部高阻高密度的物质侵入地壳上部而引起的异常分布, 地磁异常的幅度和频率的强烈变化也反映了这个特征. 此外, 古玉-沙马地区较大的均衡负异常, 表明该地区存在质量亏损, 该地区的均衡力为上升的力. 由于印度板块的

挤压和均衡力的作用, 察隅-沙马地区与雅鲁藏布江大拐弯地区相似^[8]属于快速隆升的地带。

5 结论与讨论

(i) 测区内的地质结构呈条块结构, 地球物理场特征与区内的断裂带和各块体有较好的对应关系。

(ii) 金沙江为北倾斜的深大断裂带, 断裂带主要由高电阻率、高密度和高磁性的基性超基性岩构成, 而怒江断裂带是由低电阻率、低密度和低磁性的物质组成。

(iii) 澜沧江断裂带是一个陡立的断裂, 该带地球物理场特征和金沙江带相似, 以澜沧江断裂带和怒江断裂带为界, 剖面两边的地壳物性结构有明显的差别。

(iv) 冈底斯块体的地质结构复杂, 包含了 3 个次级块体, 且地壳内的高导层明显的北倾, 而羌塘和巴颜喀拉块体的高导层较厚且基本呈水平分布。

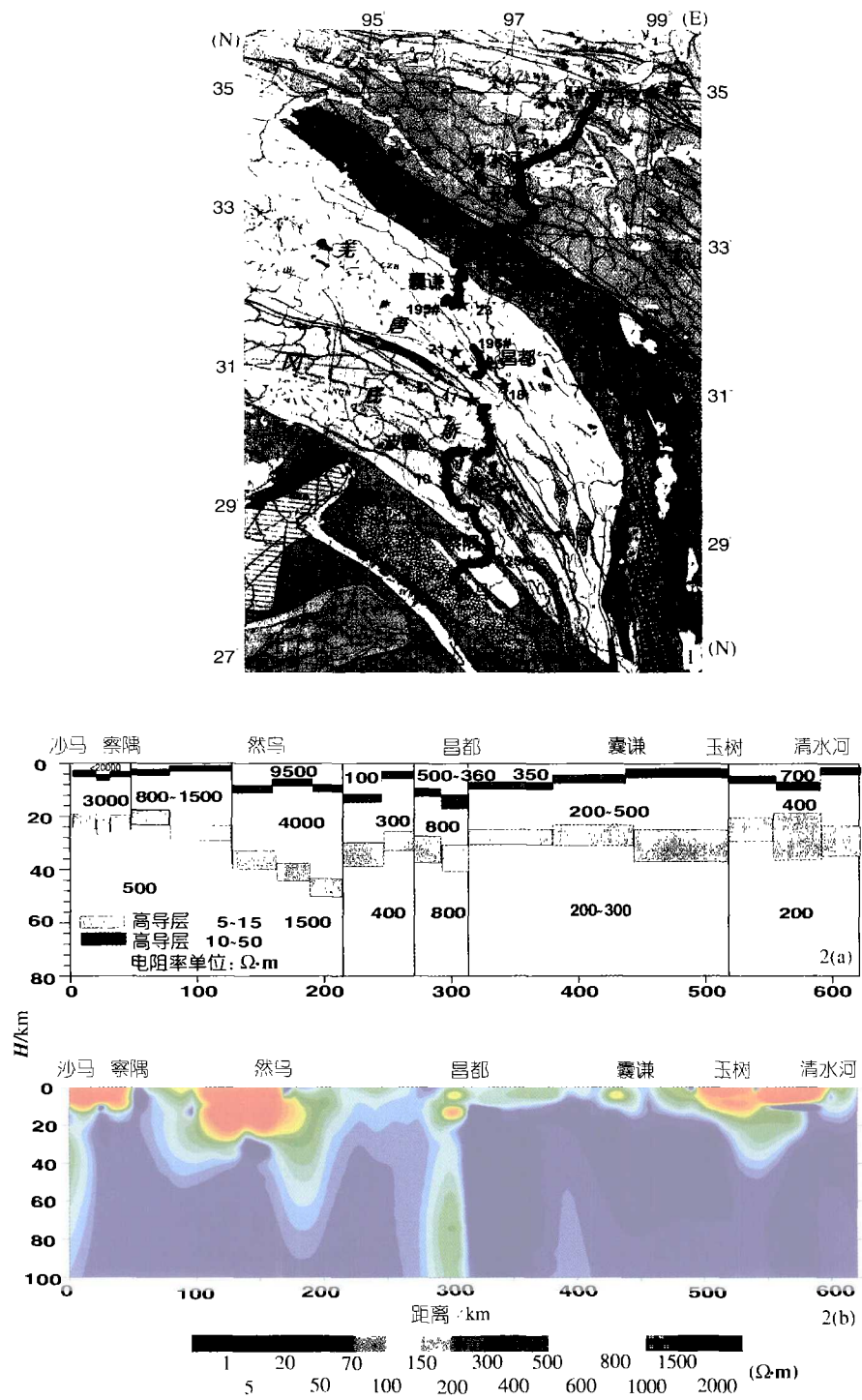
(v) 研究区域内由南向北构造活动逐步减弱, 剖面南端由于印度板块的挤压和重力均衡上升力的作用仍处于快速隆升状态。

(vi) 青藏高原的东部地区在印度板块向北运动的挤压和北部巴颜喀拉块体的阻隔下, 各块体间的断裂带向北倾斜插入地壳中, 倾角由南向北逐步减小, 北部地区地壳结构处于调整状态, 壳内的结构较为平缓, 而南部地区受印度块体向北挤压, 壳内构造运动较为强烈, 羌塘块体较厚且较低的电阻率分布以及怒江和澜沧江断裂带的陡立构造, 可能是由于高原深部物质向东南方向流动汇集于此, 削弱了块体向北的挤入影响。

致谢 感谢金维俊、陈云、卢景奇、刘旭华、于得武和黄伟等野外观测期间的辛勤工作。

参 考 文 献

- 1 Kosarev G, Kind R, Sobolev S V, et al. Seismic evidence for a detached indian lithospheric mantle beneath Tibet. *Science*, 1998, 283(5406): 1306~1309
- 2 孔祥儒, 王谦身, 熊绍柏. 青藏高原西部综合地球物理与岩石圈结构研究. *中国科学, D 辑*, 1996, 26(4): 308~315
- 3 Makovsky Y, Klemperer L, Huang Liyuan, et al. Structure elements of the Southern Tethyan Himalaya Crust from wide angle seismic data. *Tectonics*, 1996, 15(5): 997~1005
- 4 孔祥儒, 王谦身, 熊绍柏. 青藏高原西部综合地球物理剖面 and 岩石圈结构与动力学. *科学通报*, 1999, 44(12): 1257~1265
- 5 Zeng Rongsheng, Gao Rui. A Review On the Studies of Lithospheric Structures and Dynamics in Tibetan Plateau, China National Report on Seismology and Physics of the Earth's Interior for the 21th General Assembly of IUGG. Beijing: China Meteorological Press, 1995. 41~53
- 6 魏文博, 陈乐寿, 谭汉东. 西藏高原大地电磁探测——亚东-巴木错沿线地区壳幔电性结构. *现代地质*, 1997, 11(3): 366~374
- 7 Chen Leshou, Booker J R, Jones A G, et al. Electrically conduction crust in Southern Tibet from Indepth magnetotelluric surveying. *Science*, 1996, 274: 1694~1696
- 8 钟大赉, 丁 林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. *中国科学, D 辑*, 1996, 26(4): 289~295



1. 青藏东南部地球物理测线剖面及地质结构图：●重力及地磁测点，★大地电磁测点；
2. 清水河-沙马大地电磁剖面的电阻率结构：(a) 一维电性结构模型；(b) 二维电阻率分布剖面