

# 南海东北部陆缘基底磁异常反演与解释

雷文敏, 吴健生

(同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 在对南海东北部陆缘的磁场资料展开多尺度分析处理的基础上, 结合中生代深度资料, 反演求取了前中生代基底的视磁化强度分布。通过对现有综合钻井和地震等资料进行综合分析, 论述了基底视磁化强度分布, 推测研究区视磁化强度高值带北段可能受制于陆壳, 而南段特高值则可能是受次洋壳的改造作用, 研究区西部的视磁化强度低值区是一套古生代浅变质岩系, 视磁化强度负值区的潮汕坳陷及其东南部基底具有洋壳或准洋壳性质。

**关键词:** 南海东北部; 前中生界基底; 视磁化强度; 基底岩性

**中图分类号:** P631.2

**文献标识码:** A

## Inversion and Interpretation of Magnetic Anomalies at Northeastern Margin Basement of the South China Sea

LEI Wenmin, WU Jiansheng

(State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on multi-scale processing and analysis of the magnetic data of northeast continental margin of the South China Sea, the apparent magnetization of pre-Mesozoic basement was calculated. Through comprehensive analysis of available drilling and seismic data, the distribution characteristics of apparent magnetization of the basement have been discussed. The northern portion of the high apparent magnetization belt may be subject to continental crust, and the southern portion with special high value may have been resulted from the reform of sub-oceanic crust. In the western study area with low apparent magnetization, there is a suit of Paleozoic epizonal metamorphism rock series. Chao-Shan depression and its southeast basement with negative apparent magnetization seem to be oceanic crust or quasi-oceanic crust by nature.

**Key words:** the Northeast of the South China Sea; pre-Mesozoic basement; apparent magnetization; basement lithology

南海是一个边缘海, 具有独特的构造格局和丰富的海底资源, 深受国内外学术界的关注。20 世纪 90 年代以来, 在珠江口盆地新生界基底之下发现了具有沉积地层特点的地震反射特征, 开始了南海北部陆缘中生界的研究。郝沪军等<sup>[1]</sup>提出了将地震反射层判断为中生界的 3 点依据, 认为潮汕坳陷内沉积了上三叠统一侏罗统、下白垩统和上白垩统等 3 套海相地层。21 世纪以来, 在南海潮汕坳陷地区的科探井证实了南海北部陆缘中生界海相地层的存在<sup>[2]</sup>, 也奠定了南海北部中生界作为油气勘探新领域的地位。作为正在探索的油气勘探新领域, 迫切需要从区域上来认识南海东北部中生界基底的属性等特征。

迄今在南海东北部有近 60 个钻孔遇到前新生界基底。王家林等<sup>[3]</sup>结合钻井和岩石物性, 定性地推断了珠江口盆地前新生界基底主要由古生代变质岩、中生代中酸性侵入岩、中生代沉积岩、中基性岩浆岩、中生代变质岩组成。陈冰等<sup>[4]</sup>在计算新生代沉积基底深度的同时, 也在此约束下反演了基底视磁化强度。郝天珧等<sup>[5]</sup>根据岩石磁性及钻井岩芯测定结果总结得出南海基底岩石及地层磁性特征, 并且反演海域磁性基底的宏观分布, 推测珠江口盆地坳陷区内以变质基底为主, 南部隆起区内存在局部的岩浆岩隆起。胡登科等<sup>[6]</sup>通过反演研究南海东北部的高磁异常带, 认为东沙隆起的基底存在中生代酸性火山岩带。这些地质和地球物理研究, 揭示了南海东北部前新生界基底的一些基本特征。以往南海东北部陆缘基底视磁化强度反演是选取新生界基底

收稿日期: 2011-05-24

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2010AA09Z302); 国家自然科学基金(91028007); 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2007CB41170602)

第一作者: 雷文敏(1986—), 女, 博士生, 主要研究方向为综合地球物理。E-mail: min7887@163.com

通讯作者: 吴健生(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 理学博士, 主要研究方向为综合地球物理。E-mail: wujiansh@tongji.edu.cn

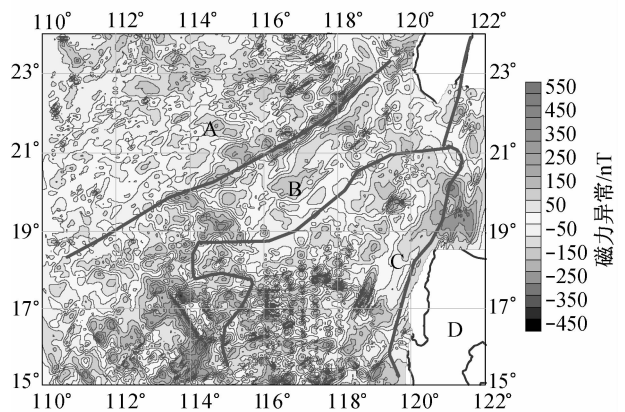
为顶界面。岩石物性的研究表明,中、新生代沉积层无磁性。因此磁异常反演时,新生界底面并不能作为磁性顶界面,随着研究区厚度可达几公里的中生代地层的发现,不考虑这套地层的影响将会给基底视磁化强度反演结果带来不合理性。本文根据重力反演所得的前中生界基底深度资料,进行视磁化强度反演并进行了推断解释。

# 1 资料基础

## 1.1 基底磁异常提取

本文重点研究在 17°~24°N, 112°~120°E 范围内的南海东北部地区,包括北部断阶带、珠江口盆地、潮汕坳陷、台西盆地、南部隆起带及其东南部,主要由一系列新生代盆地和中生代沉积区组成。

陈冰在文献[4]中对南海东北部磁异常,综合采用压制因子法和阻尼因子法,进行变倾角化极,且进行了分区(图 1),其中北部异常区(图 1 中 A)主要位于陆架区,一般以低值正、负异常为主,异常总体为 NE 向,局部为 NEE 和 NW 向,区内珠江口盆地的 3 个凹陷区出现较平缓的异常。中部异常区(图 1 中 B)主要位于陆坡区,磁异常呈 NE 向展布,异常变化大。区内有一条 NE 向展布的高值磁异常,异常值一般约 300 nT,最大值达 350 nT 以上。南部异常区(图 1 中 C)主体位于南海的中央海盆,以正负相伴的磁条带为主。东部磁异常区(图 1 中 D)是与海沟方向一致的负值异常。本文对上述化极磁力异常  $\Delta T_{\perp}$ ,进行二代小波[7]多尺度分解,提取三阶逼近场(图 2)作为基底产生的异常。处理后研究区出现相当明显的低—高一低相间,走向 NE 的条带。



A 为北部异常区;B 为中部异常区;C 为南部异常区;D 为东部异常区

图 1 南海东北部磁力化极异常图

Fig.1 Magnetic reduction-to-pole anomaly map of the Northeast of the South China Sea

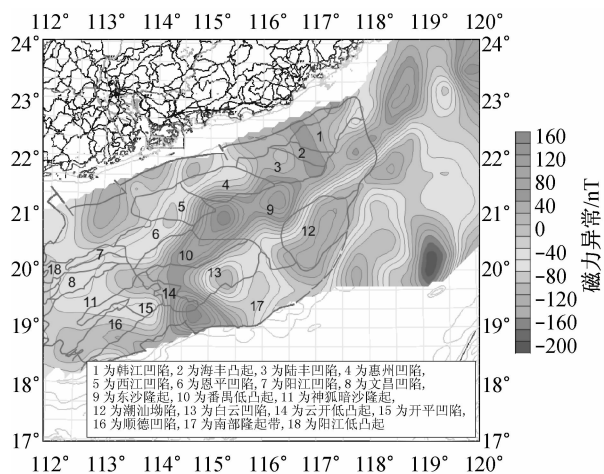


图 2 研究区磁异常三阶逼近场

Fig.2 Third-order approximation field of magnetic anomaly of the studied area

## 1.2 前中生界基底深度新资料

江凡[8]在新采集的能够较好揭示中生界基底信息的地震资料约束下,利用重力异常消除新生界地层影响后,在全区开展单一密度界面反演,并对重点区块开展联合反演,得到完整且合理可靠的区域中生界底界面深度。本文用其求取的中生界底界面深度[8]作为基底磁性层的顶深(图 3)。中生界底界面深度呈现较明显的 SW—NE 的构造走向。惠州凹陷、西江凹陷、恩平凹陷、潮汕坳陷、白云凹陷均对应着较深的中生界底界,其中,潮汕坳陷存在相当厚的中生代地层,厚度值在 3.0~6.0 km 之间。东沙隆起则对应着较浅的中生界底界。番禺低凸起的中生界底界深度由西向东从 8.0 km 向 2.5 km 逐渐变浅。另外,韩江凹陷、海丰凹陷与陆丰凹陷中生界底界面较其他凹陷浅。

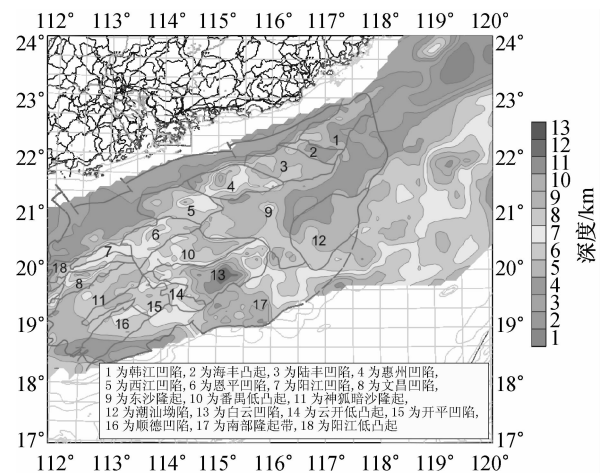


图 3 磁性基底顶界面深度

Fig.3 Top interface depth of the magnetic basement

2 视磁化强度反演与解释

2.1 反演原理

基底的视磁化强度反演采用空间域迭代的方式. 假设磁性基底的顶界面为  $S$ , 深度为  $h$ , 平均深度为  $H$ , 底界面为  $W$ , 深度为  $D$ , 如图 4 所示.  $S$  面以上围岩磁化强度  $J=0$ ,  $S$  面和  $W$  面之间的磁化强度为所求的未知数.

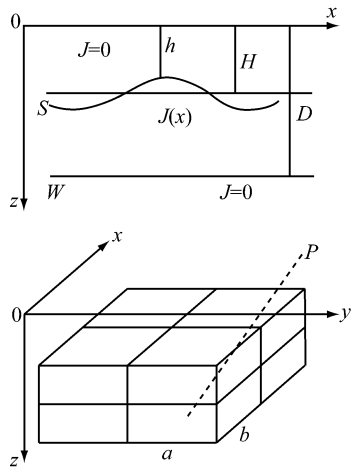


图 4 磁性界面及棱柱体组合体模型

Fig.4 Magnetic interface and prism combination model

具体计算时,用棱柱组合体模型模拟起伏磁性界面,棱柱体水平尺寸分别等于测网的点距与线距,棱柱体单元内部均匀垂直磁化,各个棱柱体的磁化强度可以不同. 单个棱柱体在观测点  $P(x,y,0)$  产生的磁异常为

$$Z_{a\perp}(x,y)=$$
$$J(x',y')\left[\arctan\frac{(x-x_1)(y-y_1)}{h\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+h^2}}-\right.$$
$$\left.\arctan\frac{(x-x_1)(y-y_1)}{D\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+D^2}}\right]\left|\begin{matrix}x'+a\\x'\end{matrix}\right|\begin{matrix}y'+b\\y'\end{matrix}$$
(1)

式中:  $(x,y)$  为观测点坐标;  $(x_1,y_1)$  为场源坐标;  $(x',y')$  为长方体左上角点坐标;  $a$  和  $b$  分别是棱柱体长和宽.

起伏界面可以用  $N\times M$  个棱柱组合体代替,第  $(x_h,y_p)$  点上磁异常写为

$$Z_{a\perp}(x_h,y_p)=\sum_{j=1}^N\sum_{i=1}^MJ(x_i,y_j)\cdot$$
$$\left[\arctan\frac{(x_h-x_1)(y_p-y_1)}{h_{ij}\sqrt{(x_h-x_1)^2+(y_p-y_1)^2+h_{ij}^2}}-\right.$$

$$\left.\arctan\frac{(x_h-x_1)(y_p-y_1)}{D_{ij}\sqrt{(x_h-x_1)^2+(y_p-y_1)^2+D^2}}\right]\left|\begin{matrix}x_i+a\\x_i\end{matrix}\right|\begin{matrix}y_j+b\\y_j\end{matrix}$$
(2)

$$G_{ij}=\left[\arctan\frac{(x_i-x_1)(y_j-y_1)}{h_{ij}\sqrt{(x_i-x_1)^2+(y_j-y_1)^2+h_{ij}^2}}-\right.$$
$$\left.\arctan\frac{(x_i-x_1)(y_j-y_1)}{D\sqrt{(x_i-x_1)^2+(y_j-y_1)^2+D^2}}\right]\left|\begin{matrix}x_i+a\\x_i\end{matrix}\right|\begin{matrix}y_j+b\\y_j\end{matrix}$$
(3)

式中:  $M$  和  $N$  分别是  $x$  和  $y$  方向的测点数;  $G_{ij}$  为格林函数.  $Z_{a\perp}$  和  $G_{ij}$  为已知值,  $J=G_{ij}^{-1}Z_{a\perp}$  即为所求.

利用最小二乘法求解线性方程组, 如果计算值与观测值之间偏差达到最小或迭代次数达到要求则停止迭代. 在算法实现过程中, 设计滑动窗口以提高计算效率, 下延异常至平均界面以减弱边界效应, 并且在下延过程中加入正则化因子以增加计算的稳定性.

2.2 反演结果

以中生界底界面为上顶面, 取磁性基底底界面深度为 18 km, 采用上述空间域迭代方法反演求取前中生代基底的视磁化强度分布. 开平 1-1-1 并于 1 884.0 m 以下见变质粉砂岩<sup>[4]</sup>. 变质粉砂岩的岩石磁化强度为  $1.36\times10^{-3}\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ . 据此标定此区域的视磁化强度值, 并作为反演的约束. 在拟合均方差为 4 nT 时得到了南海东北部前中生代基底的视磁化强度分布, 见图 5.

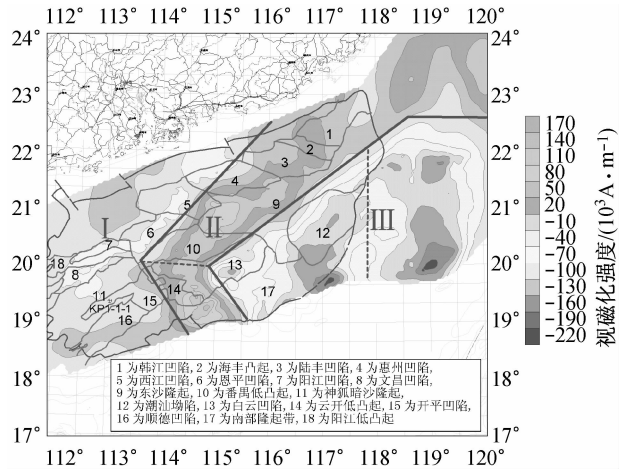


图 5 研究区前中生代基底的视磁化强度分布

Fig.5 Apparent magnetization distribution of the pre-Mesozoic basement of the studied area

反演结果表明, 从大范围上来看, 视磁化强度分布与新生界基底构造单元分布不具有对应性, 例如白云凹陷明显被分成两个区块. 本文将视磁化强度分布分为三个大的区块. 区域视磁化强度低值区(图

5,Ⅰ区),在西江凹陷、恩平凹陷、阳江凹陷、文昌凹陷、神狐暗沙隆起、开平凹陷和顺德凹陷存在低值带,约 $20\times10^{-3}\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ ;区域视磁化强度高值区(图 5,Ⅱ区),在珠一坳陷中东部、东沙隆起西部、番禺低凸起存在 NE 向高值带,至白云凹陷西部和云开低凸起转向 NW 走向,强度约为 $180\times10^{-3}\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ ;区域视磁化强度负值区(图 5,Ⅲ区),在台西南盆地及其南部区域、潮汕坳陷及其南部区域、白云凹陷东段及其东南部区域存在负的视磁化强度带,幅值为 $25\times10^{-3}\sim220\times10^{-3}\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

### 2.3 基底岩性推断

根据南海东北部陆缘的视磁化强度分布图,结合地质特征、岩石物性、地球物理场特征以及钻井资料和地震资料,推断了基底的岩性分布。

研究区存在一个明显的磁化强度高值带,贯穿了台西盆地、珠一坳陷东部、东沙隆起西部、白云凹陷西部及云开低凸起,直至南部隆起带。前人指出东沙隆起为中生代晚期岛弧,其基底存在中生代酸性火山岩带<sup>[6]</sup>,也对应了该区。从视磁化强度分布图上可以看出,高值区的北段,韩江凹陷、海丰凸起、陆丰凹陷、惠州凹陷走向为 NE,强度值中高,幅值在 $50\times10^{-3}\sim150\times10^{-3}\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ ,推断为中高磁性的中酸性侵入岩。从形态和强度分析,可能是具有高剩磁强度的晚侏罗世中酸性火山岩引起,构造配置上推测属弧后盆地类型。而高值区的南段,云开低凸起东南部和南部隆起区走向为 NW 向,强度值特高,幅值在 $100\times10^{-3}\sim200\times10^{-3}\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ ,应是中生代中基性、基性岩浆岩。本文推测高值区北段可能受制于陆壳,而南段特高值则可能是受次洋壳的改造作用。研究区西部的视磁化强度低值区,分析认为是一套下古生代浅变质岩。研究区东南部,出现近 NS 向的视磁化强度负值分布块,反演揭示视磁化强度幅值在 $25\times10^{-3}\sim200\times10^{-3}\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ 。负的视磁化强度说明岩石保留的是剩余磁性,并且可能是反向磁化。通常洋壳的剩余磁化强度比感应磁化强度大,这是解释条带状海洋磁异常的前提<sup>[9]</sup>。本文认为视磁化强度负值区基底具有洋壳或准洋壳性质,与邵磊等<sup>[2]</sup>在潮汕坳陷发现海相中生代地层呼应,并进一步落实了海相地层的规模。地震纵波速度<sup>[10]</sup>在上述视磁化强度负值区的提高也支持了本文的推断,见图 6。此外,视磁化强度负值区在台西南盆地与潮汕坳陷之间被一条较弱的负值带分割开来,据此推断该分隔带可能是岛弧链或是古南海(特提斯海)的洋中脊。

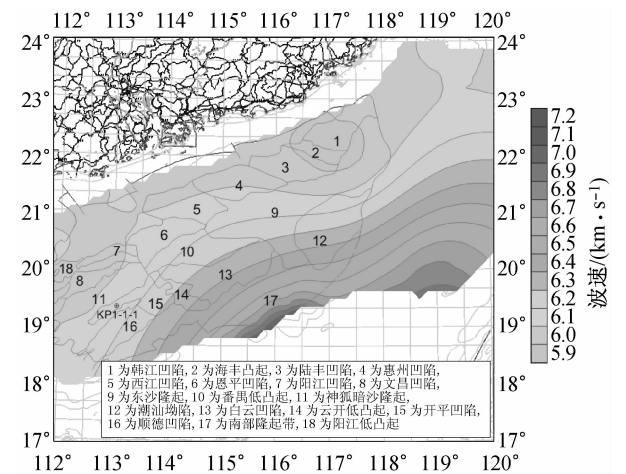


图 6 研究区 10.0 km 深度切面的地震纵波速度分布图  
Fig.6 Seismic P-wave velocity distribution in 10.0 km section of the studied area

### 3 结论

随着南海北部陆缘中生代地层的发现与证实,磁异常反演时新生界底面并不能作为磁性顶界面,还需要考虑其下的中生代沉积层。江凡<sup>[8]</sup>在新采集的能够较好揭示中生界基底信息的地震资料约束下,从重力异常反演得到了可靠的前中生界基底深度。本文在此基础上采用空间域迭代反演方法求取前中生界基底的视磁化强度分布,并据此进行分区。去掉中生代厚度层后的反演结果突出显示了视磁化强度高值带,胡登科等<sup>[6]</sup>指出东沙隆起为中生代晚期岛弧,其基底存在中生代酸性火山岩带,对应了该区。本文反演揭示高值带的走向由北东向转为北西向,且北西向部分强度值特高,据此推断其北段为中生代中酸性侵入岩,南段为中生代中基性、基性岩浆岩,并且高值区北段可能受制于陆壳,而南段特高值则可能是受次洋壳的改造作用。尤其重要的是在中生代地层厚度较大的潮汕坳陷等构造区块,反演结果突出显示了视磁化强度负值区,推断潮汕坳陷及其东南部基底具有洋壳或准洋壳性质,与邵磊等<sup>[2]</sup>在潮汕坳陷发现海相中生代地层的存在呼应。本文进一步落实了海相地层的规模,并依据视磁化强度负值区在台西南盆地与潮汕坳陷之间被一条较弱的负值带分割开来,推断该分隔带可能是岛弧链或是古南海(特提斯海)的洋中脊。

### 参考文献:

[1] 郝沪军,张向涛.重磁资料在潮汕坳陷中生界油气勘探中的应

用[J].中国海上油气,2003,17(2):128.

HAO Hujun, ZHANG Xiangtao. An application of gravimetric and magnetic data in Mesozoic petroleum exploration in Chaoshan depression, South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2003, 17(2): 128.

[ 2 ] 邵磊,尤洪庆,郝沪军,等.南海东北部中生界岩石学特征及沉积环境[J].地质评论,2007,53(2):164.

SHAO Lei, YOU Hongqing, HAO Hujun, et al. Petrology and depositional environments of Mesozoic strata in the northeastern South China Sea[J]. Geological Review, 2007, 53(2): 164.

[ 3 ] 王家林,张新兵,吴健生,等.珠江口盆地基底结构的综合地球物理研究[J].热带海洋学报,2002,21(2):13.

WANG Jialin, ZHANG Xinbing, WU Jiansheng, et al. Integrated geophysical researches on base texture of Pearl River mouth basin[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2002, 21(2): 13.

[ 4 ] 陈冰.南海东北部新生代沉积盆地基底的地球物理特征及其地质解释[D].上海:同济大学海洋与地球科学学院,2004.

CHEN Bing. Geophysical features and geological interpretation of the sedimentary basin basement in the northeast area of South China Sea [D]. Shanghai: College of Ocean and Earth Science of Tongji University, 2004.

[ 5 ] 郝天兆,徐亚,赵百民,等.南海磁性基底分布特征的地球物理研究[J].地球物理学报,2009,52(11):2763.

HAO Tianyao, XU Ya, ZHAO Baimin, et al. Geophysical research on distribution features of magnetic basements in the South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(11): 2763.

[ 6 ] 胡登科,周蒂,吴湘杰,等.南海东北部高磁异常带成因的地球物理反演研究[J].热带海洋学报,2008,27(1):32.

HU Dengke, ZHOU Di. Origin of high magnetic anomaly belt in northeastern south china sea as indicated by geophysical inversion [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2008, 27(1): 32.

[ 7 ] Sweldens W. The lifting scheme: a construction of second generation wavelets [J]. Siam Journal on Mathematical Analysis, 1997, 29(2): 511.

[ 8 ] 江凡.南海东北部中生界分布综合地球物理研究[D].上海:同济大学海洋与地球科学学院,2010.

JIANG Fan. Integrated geophysical study of Mesozoic distribution on northeastern continental margin of the South China Sea[D]. Shanghai: College of Ocean and Earth Science of Tongji University, 2010.

[ 9 ] 王述功,高仰.南海海盆磁异常理论剖面的计算和磁条带的初步分析[J].海洋科学,1990,11(6):9.

WANG Shugong, GAO Yang. Calculation on theoretical profiles of magnetic anomalies and preliminary analyses on magnetic lineation in south china sea basin[J]. Marine Sciences, 1990, 11(6): 9.

[10] 姚伯初,万玲,曾维军,等.中国南海海域岩石圈三维结构及演化[M].北京:地质出版社,2006.

YAO Baichu, WAN Ling, ZENG Weijun, et al. The three-dimensional structure of lithosphere and its evolution in the South China Sea[M]. Beijing: Geology Press, 2006.

(上接第 1679 页)

参考文献:

[1] 姚祖康.水泥混凝土路面设计[M].合肥:安徽科学技术出版社,1999.

YAO Zhukang. Design of cement concrete pavement[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1999.

[2] 谈至明,姚祖康.软土地基不均匀沉降对铺面结构影响的分析[J].岩土工程学报,1989,11(3):54.

TAN Zhiming, YAO Zukang. Structural analysis of concrete pavements on soft subsoils with differential settlements [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(3): 54.

[3] 周虎鑫,陈荣生.软基处理路堤工后沉降指标确定方法的研究[J].华东公路,1995(3):28.

ZHOU Huxin, CHEN Rongsheng. Settlement index of Embankment after soft ground treatment [J]. East China Highway. 1995(3): 28.

[4] 何兆益,周虎鑫.软土地基容许工后不均匀沉降指标值探讨[J].华东公路,1996(1):16.

HE Zhaoyi, ZHOU Huxin. Discussion of settlement indexes Embankment after soft ground treatment [J]. East China Highway. 1996(1): 16.

[5] 周虎鑫,陈荣生.高等级公路工后不均匀沉降指标研究[J].东南大学学报,1996,26(1):54.

ZHOU Huxin, CHEN Rongsheng. Research on differential settlements on construction of pavement over soft soil foundation [J]. Journal of Southeast University. 1996, 26(1): 54.

[6] 刘银生,杨东援.填土路基不均匀沉降分析[J].中南公路工程,1999,24(4):3.

LIU Yinsheng, YANG Dongyuan. Differential settlement analysis filling embankment [J]. Central South Highway Engineering. 1999, 24(4): 3.

[7] 孙德志,王慎堂,张庆贺.非均匀地基上弹性地板的变形特征[J].河南大学学报,2002,32(1):91.

KONG Dezhi, WANG Shentang, ZHANG Qinghe. Deformation feature of the elastic foundation board on non-uniform ground [J]. Journal of Henan University. 2002, 32(1): 91.

[8] 同济大学.新老路基结合部处治技术[R].上海:同济大学交通与运输工程学院,2003.

Tongji University. Treatment technique of conjunction of old-new road[R]. Shanghai: College of Transportation Engineering. 2003.