

doi:10.3799/dqkx.2015.033

一种基于物性数据的深部三维地质建模方法

余翔宇, 徐义贤

中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

摘要: 地质采样信息不足是制约深部三维地质建模的重要因素, 深部物性探测数据由于其易于获取而能够有效形成可视化模型。结合这一特点, 在地质调查项目工作中探索出了一种基于物性探测数据的三维地质建模方法。它首先利用岩石样品物性测量实验数据提取出物性参数及其对应地质属性的映射关系, 然后将不同地球物理方法所获取到的物性数据进行综合建模并解释, 最后将解释后的可视化模型转换为地质三维模型。实践证明, 该方法能够针对性地解决项目中的一些深部地质三维建模问题。

关键词: 地质体三维建模; 物性数据解释; 数据可视化; 地球物理。

中图分类号: TP391

文章编号: 1000-2383(2015)03-0419-06

收稿日期: 2014-04-05

A 3D Geological Modeling Method Based on Geophysical Data

Yu Xiangyu, Xu Yixian

Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Inadequate geological sampling information is a major constraint for 3D geological modeling of the deep geological body. Since it is relatively easier to acquire the deep geophysical data, the visualization model of the geophysical data can be formed effectively. In this study, a 3D geological modeling method by the geophysical data collected in the geological survey is proposed. It involves firstly extracting the mapping function from geophysical data to the geological property by geophysical experiment on the samples, and then integrating the visualization models constructed from multi-source geophysical data for interpretation, and finally converting the interpreted visualization model to the 3D geological model. The method proves feasible for solutions on 3D modeling concerning deep geological bodies in the project.

Key words: 3D geological modeling; geophysical data interpretation; data visualization; geophysics.

0 引言

当前, 地质工作者普遍认为以三维可视化技术来展示地质结构已逐渐成为地质调查工作的趋势。从传统的地质填图到三维模型的构造, 数据的需求发生了激增。但实际工作中, 通常无法经济有效地获取到大量与深度相关的地质信息, 这就给深部(1 km 以下)三维地质建模带来了困难, 也使得深部探测工作将更多地依赖于地球物理方法(Trampert and van der Hilst, 2005)。近年来, 随着地球物理观

测仪器与技术的快速发展, 地球物理工作者们已可以对深部地质体进行层析成像式的探测, 获取到相关深部岩石的物性参数(密度、磁化率、电阻率、地震波速等), 并进一步形成物性探测数据的三维可视化模型, 在传统的地质体三维建模工作中, 人们通常以地质采样信息(如钻孔/信手剖面)为主确定模型的主要框架, 以物性资料为辅验证/推理出细节信息; 而对于物性资料丰富而地质采样信息相对贫乏的地质体三维建模问题却无能为力。

作为中国地质调查局的三维地质填图试点项

基金项目: 中国地质调查项目“西准噶尔克拉玛依后山地区深部地质调查试点”(No. 1212011220245); 中央高校基本科研业务费专项(No. CUGL130208)。

作者简介: 余翔宇(1979-), 男, 博士, 主要从事数据三维可视化, 地球物理解释模型方面研究。E-mail: yuxiangyu@sina.com

引用格式: 余翔宇, 徐义贤, 2015. 一种基于物性数据的深部三维地质建模方法. 地球科学——中国地质大学学报, 40(3): 419-424.

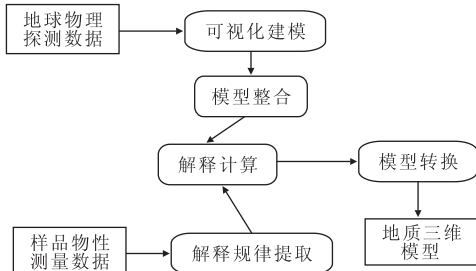


图 1 实现流程

Fig. 1 Implementation process

目,西准噶尔克拉玛依后山地区深部地质调查工作对一定深度下的三维地质建模提出了要求,从而给大范围以及一定深度(如 1~10 km)的三维地质建模技术提出了挑战.本文描述笔者在该项目实施过程中经过不断总结与实践逐渐积累的一种基于物性数据的三维地质建模方法.有别于传统的地质三维建模思路,它主要通过整合多源物性探测数据格网,获取其所代表的地质涵义(如岩性),再经过转换或映射生成地质体三维模型,整个实现流程如图 1 所示.

目前,基于该方法所研发的软件地球物理—地质映射建模系统(Geophysical-Geological Mapping Modeling System, GGMS)已在本次地调项目中得到了一定应用,并取得了良好的效果.下文将依次对以该方法实现步骤中所涉及到的 3 个关键问题依次进行详细描述,即:(1)如何根据有限的岩石样品物性测量数据进行物性数据解释规律提取;(2)如何运用该解释规律对地球物理探测数据所建立的可视化模型进行解释计算;(3)如何将解释计算后得到的模型转换为地质三维模型.

1 物性数据解释规律提取

基于地球物理探测方法(重力、地震、电法等)所获取的物性数据(密度、地震波速、电阻率等)是一种典型的点采样.物性值对应于表达空间上某点所对应的属性描述 $g=f(x, y, z)$,其中 g 的取值对应为某区间内连续变化的数值(Martelet *et al.*, 2004).因此,对于基于物性数据的三维地质建模而言,其首要问题就是要判定物性值所代表的地质涵义.由于现实生活中地质条件的复杂以及物质之间繁杂而多样的组合方式,使得我们很难用数学函数来确切地表达物性—地质属性的映射关系.实际地质调查工作中,一般先通过实验条件(包括钻井)下测定某种采样物质的物性值,然后以此为依据并根据工作者

表 1 样品实验数据示例

Table 1 A case of the experimental data

属性	属性值
密度(g/cm^3)	2.628 7
磁化率(10^{-6})	18.800 0
电阻率($\Omega \cdot \text{m}$)	4 842.850 0
极化率(%)	0.890 1
...	...
岩性	紫红色硅质岩

的经验来推断出物性探测数据表达的意义.

为了能够更高效地对大量物性数据进行定性/定量解释.笔者利用人工智能方法来对岩石样品物性实验数据进行统计分析,建立起岩石物性及其地质属性之间的非线性映射模型逐渐成为了研究热点(Yu *et al.*, 2012).在这类映射模型的构建中,通常以样品测得的多源物性参数向量作为输入,以一个地质属性量化值作为目标输出;然后通过不断对非线性映射模型进行结构优化和参数优化,使得模型计算得到的结果与实际取样偏差最小(Wu *et al.*, 2005).如本次地质调查工作中的岩石样品物性实验数据由近 3 000 个样品所对应的记录集组成.每个样品所对应的一组实验数据如表 1 所示.则可定义非线性映射模型的一个输入为密度、磁化率、电阻率等对应属性值组合形成的物性向量;输出为岩性(如紫红色硅质岩)所对应的量化值(表 1).

笔者在 GGMS 中主要采用的是一种基于信息粒(Information Granulation)技术的非线性映射模型(Yao, 2001),该模型的主要结构如图 2 所示.除输入(实验物性向量)、输出(地质属性量化值)部分外,它主要由分类器、映射器 2 个部分组成.其中,分

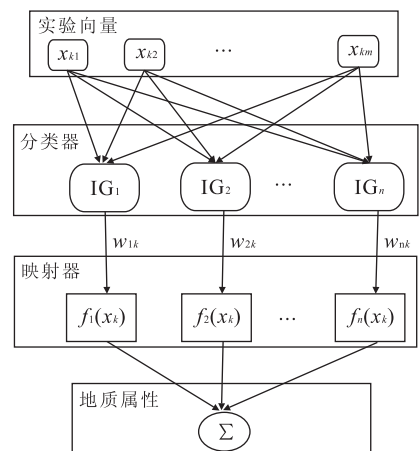


图 2 信息粒解释模型结构

Fig. 2 Structure of information grade (IG) interpretation model

类器可看作是对数据的某种聚类实现,而映射器则对应于一组形式相同但参数不同的回归函数,并用以对聚类结果进行进一步解析。由于该模型天然的将聚类算法与 RBF 神经网络结合在一起,在实际计算中能够同时发挥出二者的优势。笔者在之前的研究工作中曾应用该模型进行测井物性资料的岩性识别工作,取得了良好的效果(余翔宇等,2012)。

具体到 GGMS 应用中,笔者首先通过将实验物性向量进行模糊聚类(FCM 算法实现)以形成蕴含模糊判定的信息粒(Huang *et al.*, 2010);然后利用既定的函数形式(常数型函数如式(1)或径向基多项式函数如式(2))来对每个信息粒所对应的模糊判定进行解析,即认为最终的推理结果是由这些函数进行加权综合得到的(Lim, 2005)。最后,根据推理计算的结果与地质采样的真实属性量化值之间的偏差来进行收敛计算以确定这些函数参数,从而得到训练好的物性-地质属性非线性映射模型。在模型中所采用的映射器/模糊判定描述函数(式(1)和式(2))中, $\mathbf{x}_k = \{x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kd}\}$ 代表输入物性向量, $v_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}\}$ 代表的是第 i 个聚类中心所对应的物性向量值, $\omega_k = \{\omega_{1k}, \omega_{2k}, \dots, \omega_{nk}\}$ 为输入向量 \mathbf{x}_k 对于聚类 v_i 的模糊隶属度。

$$f_i(\mathbf{x}_k, v_i) = a_{i0}, \quad (1)$$

$$f_i(\mathbf{x}_k) = a_{i0} + a_{i1}(x_{k1} - v_{i1}) + a_{i2}(x_{k2} - v_{i2}) + \dots + a_{in}(x_{kn} - v_{in}). \quad (2)$$

为测算模型的精度,笔者以构建好的解释模型来对上述样品实验数据向量中任意抽取的 550 个向量进行验算,最后将模型得到的计算结果(地质属性输出分别取岩性与地层年代)与取样资料地质属性进行比较来验证其准确率。表 2 为进行多次比较验算后得到的不同算法分析结果。其中,稳定性指标取决于模型结构复杂程度和参数的数量,它决定了计算过程中是否容易通过调整参数与结构以优化计算结果(汪宏年等,1998)。综合表 2 的分析结果可知,信息粒模型与支持向量机(Support vector machine, SVM)比较适用于构建这种物性向量解释系

表 2 几种方法比较结果

Table 2 The comparison result of several methods

方法	正确率(%)	收敛速度	稳定性
信息粒模型	87.4	较快	中
模糊聚类	83.6	快	中
硬聚类	78.8	快	高
神经网络	81.6	慢	低
支持向量机	86.5	较快	高

统(宋亮等,2011)。

2 物性可视化模型解释计算

地球物理探测方法通常是经过有计划地布线采点来获取某空间坐标点所对应的物性属性值,因此地球物理探测数据测点之间的位置关系较有规律,容易用格网来呈现(Gong *et al.*, 2004)。针对这一特点,对地球物理探测数据的可视化建模通常采用科学计算可视化技术,即首先以格网点对应的取样数据来内插出连续的物性数值变化,再通过建立颜色值与物性值之间的映射关系来进行渲染。图 3 为笔者在 GGMS 系统中建立的测区地下 1~17 km 密度可视化模型与磁化率可视化模型。

利用第 1 部分训练好的非线性映射模型,可以将地球物理可视化模型中每个格网点所对应的地质属性计算出来。通常在岩石样品物性测量实验中会对样品的所有物性参数进行测量。但在实际应用中由于受到探测条件与探测仪器的影响,对于数据格网中的空间点无法应用到所有的物性探测分量来进行计算。因此,在 GGMS 实现中,笔者允许用户根据自己获取并且进行使用的物性参数分量来对样品实验物性数据进行组织与训练,形成适合用户自己的非线性映射模型。此外,岩石样品采集时所对应的空间坐标(x, y, z)也会根据用户的需要而作为重要的参数分量参与到模型收敛计算中。

在对如图 3 所示的地球物理数据可视化模型进行解释计算时,系统首先根据用户所选择的训练参数分量来进行综合(插值计算)并抽取待计算的物性向量。如本文工作中主要需综合的物性可视化模型有 4 个(分别为密度、磁化率、电阻率、极化率可视化模型)。则 GGMS 首先在岩石样品物性测量数据中抽取对应的物性形成训练向量,并提取出物性向量到地质属性的映射规律;然后根据定义好的模型向量组织顺序,依次在这 4 个可视化模型中抽取每个格网点所对应的物性值作为输入进行计算。其具体计算步骤如下:

(1) 根据该物性向量与每个模糊聚类中心 $k(k=1, 2, \dots, n)$ 的距离计算其与各个信息粒的模糊隶属度 u_i (徐海波等,2006),如式(3)所示。其中, d_i 表示物性向量与第 1 部分中模型提取所产生的聚类中心 v_i 之间的距离; m 代表模糊聚类权重指数。

(2) 将 u_i 值代入式(4)中进行计算得到该格网点所对应的地质属性量化值,其中函数 $f_i(\mathbf{x}_k)$ 定义

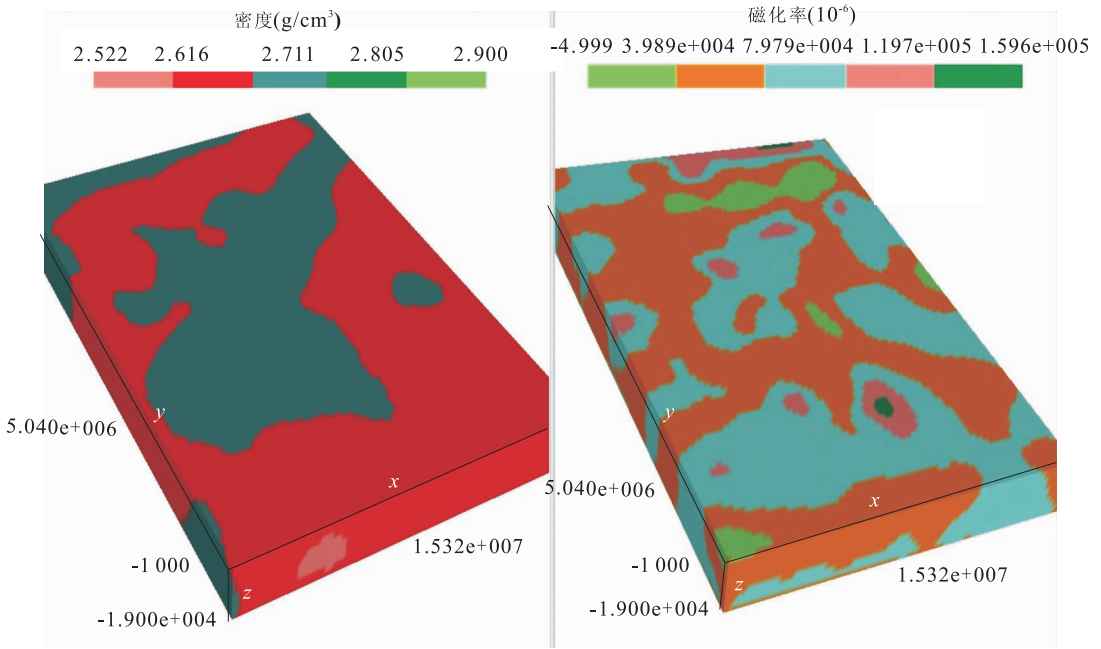


图 3 密度和磁化率可视化模型

Fig. 3 Visualization models of density and magnetic susceptibility

如式(1)所示:

$$u_i = 1 / \sum_{k=1}^n (d_i / d_k)^{2/(m-1)}, \quad (3)$$

$$y_k = \sum_{i=1}^n u_i f_i(\mathbf{x}_k). \quad (4)$$

3 三维模型转换

经过第 2 部分中的解释计算, 格网点所对应的地质属性已被确定下来. 剩下的工作即如何根据解释后的格网模型构建出地质体三维可视化模型.

与物性可视化模型不同, 地质三维可视化模型除了空间信息(坐标)外, 更多地需要以一定拓扑关系来记录地质属性信息, 它关注的是地质属性的边界条件(Malehmir *et al.*, 2008). 因此, 地质体三维建模多采用基本体元(三棱柱、四面体、六面体等)进行构造, 每个体元都具有自身唯一的地质属性(如果不唯一, 则进行分解), 然后将这些体元进行组合形成三维模型(Ning and Wei, 2009). 由于格网模型中每个格网单元可看作是一个六面体. 因此我们采用一种格网分解—合并策略来构造地质三维模型. 为了描述方便, 本文以一个二维格网为例(图 4), 假设格网点对应的地质属性分别为 1、2、3、4(各不相同). 笔者将格网进行分割(一分为四)并指定每个以格网点为中心的 4 个分割后的小格网单元具有与图

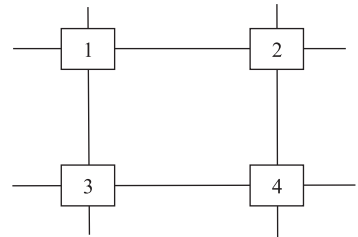


图 4 格网点地质属性

Fig. 4 Geological property in grid points

1	1	2	2
1	1	2	2
3	3	4	4
3	3	4	4

图 5 格网单元分解

Fig. 5 Grid cell decomposition

4 格网点相同的地质属性(图 5). 按照这种分解方法(三维格网对应按照六面体进行分割, 一分为八)就可以使用预先定义的渲染属性(颜色或纹理)将这些小的格网单元分别渲染出来以形成整个地质体三维模型. 然而这样做的渲染代价是巨大的, 如对于图 4 的一个基本格网就需要渲染 4 个几何单元. 因此, 必须使用合适的合并策略来减少渲染单元数量. 如假设图 5 中单元 1 与单元 2 所对应的地质属性相同, 则可将这 2 个单元合并起来, 形成一个长为 4、宽为

2 的待渲染单元.

为了避免合并后的三维体过于复杂,在具体的 GGMS 实现中,我们设计与实现了一种较高效的格网单元合并策略. 系统中将待合并的格网单元分成 2 类:(a) 分解后的格网单元,即图 5 中所示的(1~4)单元;(b) 无需分解的原格网单元,即当图 4 中(1~4)格网点所代表的地质属性相同时,该格网体无需分解. 笔者认为这 2 类格网单元只能分别合并,而彼此之间不能合并. 在程序实现中,沿着固定的格网单元的 x, y, z 三个方向中的某个方向进行搜索,判断搜索到的下一个格网单元与自己对应的地质属性是否相同,且属于同一种格网单元. 如果是,则将其进行合并. 然后再以合并后的单元作为基础在其他方向上进行搜索与合并.

4 结论

经过上述环节,基于物性数据的地质体可视化模型可以被自动化的构建出来. 图 6 为 GGMS 系统基于地球物理探测数据(密度、磁化率、电阻率、极化率)所建立的地质体岩性模型. 该模型表达深度为地下 1~19 km,传统的地质三维建模方法很难做到.

综上所述,这种基于物性数据的深部三维地质建模方法充分利用了深部物性探测数据的自身特点. 它可以针对性地解决地质采样不足或者有限的地质采样很难构成三维模型的建模问题(如测区太大). 目前该方法及其应用系统已经在项目中得到了应用. 然而,这种方法的不足也是显而易见的. 首先,物性探测数据存在可信度问题. 特别当进行插值计算时,不同物性数据的计算精度与可信度影响并不一致. 因此在用这种方法进行建模时,往往需要经验丰富的地质或地球物理专家进行指导,挑选出精度

与可信度较高的物性数据. 其次,这种建模方法对地质采样的完备性依赖较高,一旦出现了新的地质属性样品,有可能会使整个模型受到较大影响. 此外,由于受深部地球物理探测分辨率的影响,该方法的适用性也存在一定的问题. 就目前来看,它适用于表达对于边界要求不高的地质属性建模问题. 当然,在作者后续的开发工作中,也将通过建立专家知识库等方法来增加建模过程中的人工干预,以使得建模结果更加精确.

References

Gong, J. Y., Cheng, P. G., Wang, Y. D., 2004. Three-Dimensional Modeling and Application in Geological Exploration Engineering. *Computers & Geosciences*, 30 (4):391-404. doi:10. 1016/j. cageo. 2003. 06. 003

Huang, W., Ding, L. X., Oh, S. K., et al., 2010. Identification of Fuzzy Inference System Based on Information Granulation. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 4(4):575-594.

Lim, J. S., 2005. Reservoir Properties Determination Using Fuzzy Logic and Neural Networks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 49(3):182-192. doi:10. 1016/j. petrol. 2005. 05. 005

Malehmir, A., Thunehed, H., Tryggvason, A., 2008. The Paleoproterozoic Kristineberg Mining Area, Northern Sweden; Results from Integrated 3D Geophysical and Geologic Modeling, and Implications for Targeting Ore Deposits. *Geophysics*, 74(1): B9-B22. doi:10. 1190/1. 3008053

Martelet, G., Calcagno, P., Gumiaux, C., et al., 2004. Integrated 3D Geophysical and Geological Modelling of the Hercynian Suture Zone in the Champtoceaux Area (South Brittany, France). *Tectonophysics*, 382 (1): 117-128. doi:10. 1016/j. tecto. 2003. 12. 009

Ning, F. L., Wei, J., 2009. 3D Visualization of Stratum with Faults Based on VTK. 2009 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering, Beijing, 1-3. doi:10. 1109 /CISE. 2009. 5366084

Song, L., Wang, X. M., Zhao, W., et al., 2011. The Design and Implementation of the Software Package for Lithology-Petrophysical Property Joint Inversion. *Progress in Geophysics*, 26 (4): 1304-1311 (in Chinese with English abstract).

Trampert, J., van der Hilst, R. D., 2005. Towards a Quantitative Interpretation of Global Seismic Tomography. *Geophysical Monograph Series*, 160(1):47-64.

Wang, H. N., Li, Z. B., Yang, S. D., et al., 1998. Evaluation

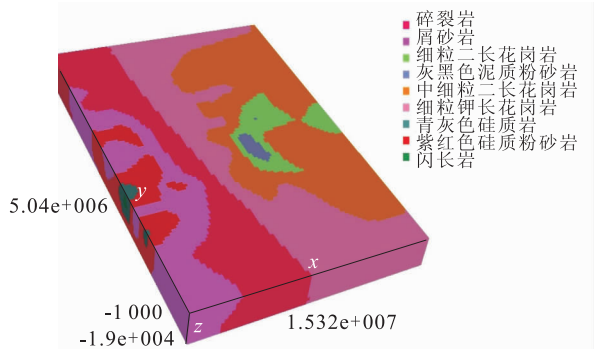


图 6 岩性三维地质模型

Fig. 6 3D geological model of lithology

of Stability and Reliability of Complex Lithology Interpreting Models. *Acta Geophysica Sinica*, 41(4): 561—569 (in Chinese with English abstract).

Wu, Q., Xu, H., Zou, X. K., 2005. An Effective Method for 3D Geological Modeling with Multi-Source Data Integration. *Computers & Geosciences*, 31(1): 35—43. doi: 10.1016/j.cageo.2004.09.005

Xu, H. B., Li, R., Zou, W., et al., 2006. Lithologic Recognition with Fuzzy Clustering. *Chinese Journal of Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 28(4): 319—322 (in Chinese with English abstract).

Yao, Y. Y., 2001. Information Granulation and Rough Set Approximation. *International Journal of Intelligent Systems*, 16(1): 87—104. doi: 10.1002/1098-111X(200101)16:1<87::AID-INT7>3.0.CO;2-S

Yu, X. Y., Xu, Y. X., Luo, M., 2012. Use Information Granulation to Construct the Well-Logging Lithology Inter-

pretation Model. *Chinese Journal of Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 34(6): 703—707 (in Chinese with English abstract).

Yu, X. Y., Xu, Y. X., Ma, H. L., 2012. Construct a Lithology Identification Model Based on Information Granulation. *Near-Surface Geophysics and Environment Protection*, Denver, 399—403.

附中文参考文献

宋亮, 王秀闾, 赵伟, 等, 2011. 岩性物性联合反演系统设计与实现. *地球物理学进展*, 26(4): 1304—1311.

汪宏年, 李舟波, 杨善德, 1998. 复杂岩性解释模型稳定性和可靠性评价. *地球物理学报*, 41(4): 561—569.

徐海波, 李瑞, 邹炜, 等, 2006. 模糊聚类实现岩性自动划分. *物探化探计算技术*, 28(4): 319—322.

余翔宇, 徐义贤, 骆森, 2012. 应用信息粒方法构建测井岩性解释模型. *物探化探计算技术*, 34(6): 703—707.

(上接418页)

Wu, H. R., Pan, Z. P., 1991. “Structural Complex” and Its Geological Significance—In the Case of West Junggarian Complexes. *Scientia Geologica Sinica*, 26(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).

Qian, G. M., 1988. Study of Fold Geometry. *Journal of China University of Mining & Technology*, (2): 72—79 (in Chinese with English abstract).

Ramsay, J. G., Huber N. I., 1991. The Techniques of Modern Structural Geology—Volume Second the Fold and Fault. Translated by Xu, S. T., Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).

Zong, R. W., Gong, Y. M., Wang, G. C., 2014. Carboniferous Stratal Sequence and Its Palaeogeographical Evolution in Southern Western Junggar, NW China. *Earth Science Frontiers*, 21(2): 216—233 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

董波, 2013. 数字矿山三维地质建模及可视化研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.

郭峰, 侯树杰, 刘如红, 等, 2012. 平衡剖面技术在前陆冲断带构造恢复中的应用——以准噶尔盆地西北缘为例. *海洋地质前沿*, 28(12): 46—51.

何登发, John, S., 贾承造, 2005. 断层相关褶皱理论与应用研究新进展. *地学前缘*, 12(4): 353—364.

江远达, 1985. 利用区域地球物理资料研究天山和准噶尔地区的深部构造. *新疆地质*, 3(4): 51—57.

李永军, 佟丽莉, 张兵, 等, 2010. 论西准噶尔石炭系希贝库拉斯组与包古图组的新老关系. *新疆地质*, 28(2): 130—136.

吕鹏, 张伟, 刘国, 等, 2013. 国外重要地质调查机构三维地质填图工作进展. *国土资源情报*, (3): 13—18.

王国灿, 徐义贤, 郁军建, 等, 2015. 基于地表地质调查基础上的地质—地球物理—钻孔三维地质调查与建模方法技术探索. *地球科学——中国地质大学学报*, 40(3): 397—406.

王玉净, 金玉玕, 江纳言, 1987. 论哈拉阿拉特组的时代及古环境特征. *地层学杂志*, 11(1): 53—57.

吴浩若, 潘正蕾, 1991. “构造杂岩”及其地质意义——以西准噶尔为例. *地质科学*, 26(1): 1—8.

钱光漠, 1988. 褶皱构造几何学研究. *中国矿业学院学报*, (2): 72—79.

Ramsay, J. G., Huber N. I., 1991. 现代构造地质学方法——第二卷褶皱和断裂. 徐树桐译. 北京: 地质出版社.

纵瑞文, 龚一鸣, 王国灿, 2014. 西准噶尔南部石炭纪地层层序及古地理演化. *地学前缘*, 21(2): 216—233.