文章编号：1004—5589（2017）02—0560—10

Tilt-depth 方法适用性研究及其应用

曹伟平，王彦国，杨博，刘建鹏，魏伯阳，李康，邓居智

东华理工大学 放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室，南昌 330013

摘要：Tilt-depth 方法是一种可以快速反演磁源上顶深度的新兴方法。二维、三维模型试验表明，tilt-depth 法反演误差与地质体的上顶埋深、厚度及水平尺度均有关，同时叠加异常也会对反演结果产生影响。实例中，将 tilt-depth 法应用于广东省下庄矿田航磁数据反演中，tilt 梯度图上展示出了两条明显的近东西走向条带异常，推断为浅部基性辉绿岩脉在深部汇聚形成，并反演了两条高磁异常带上11个位置的磁源上顶埋深。反演结果揭示了下庄矿区内北侧高磁性体深度较浅，且具有南浅北深的构造特征，而南侧高磁性体规模较大，且埋深较厚，为该区深部矿产勘查提供了有利依据。

关键词：tilt-depth 法；上顶埋深；适用性；相对误差；下庄矿田

中图分类号：P631.2　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3969/j.issn.1004-5589.2017.02.022

Applicability of tilt-depth method and its application

CAO Wei-ping, WANG Yan-guo, YANG Bo, LIU Jian-peng, WEI Bo-yang, LI Kang, DENG Ju-zhi

Fundamental Science on Radioactive Geology and Exploration Technology Laboratory, East China Unversity of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: Tilt-depth method is a new inversion method for fast estimation of the top depths of magnetic bodies. Two- and three-dimensional model tests show that the inversion error of tilt-depth method is related to the top depth, thickness and horizontal scale of geological body. In addition, superimposed anomaly also has an effect on the inversion results. Tilt-depth method is applied to the aeromagnetic data over Xiazhuang ore field in Guangdong, and the authors find that two near EW-trending anomaly zones on tilt map are produced from deep ultrabasic diabase. Tilt-depth method is used to invert top depths of 11 inversion points on the two high magnetic anomaly zones in the tilt map. Based on the inversion results, the authors found that the depth of magnetic body located in the north of the Xiazhuang ore field is relatively shallow and is getting deeper from south to north, whereas the magnetic body in the south of the Xiazhuang ore field is relatively deeper and with larger scale. This important information is very useful for the deep mineral exploration.

Key words: tilt-depth method; top buried depth; applicability; relative error; Xiazhuang ore field

0 引言

磁法勘探是地球物理勘探的一个重要分支，其发展最早，理论成熟，在区域地质调查、油气与固体矿产勘探、区域与深部构造研究、工程地质和考古等领域有着广泛的应用。对磁异常进行反演是地

收稿日期：2016-07-18；**改回日期**：2017-01-07

基金项目：国家自然科学基金（41504098，41504054）及国防科工委科研项目（科工技2013［969］号）联合资助.

通讯作者：王彦国（1985-），男，讲师，主要从事勘探地球物理学领域的教学与科研工作. E-mail：wangyg8503@126.com

质-地球物理解释中的一项重要工作，通过它可以获取场源位置、埋深等参数，并与地质资料相结合，可以获得更加丰富全面的地下地质信息，提高解释质量[1]。但在地质体参数反演中，大多反演方法计算内存大，计算效率低，还需要地质约束和物性资料，因此在地质勘探程度较低地区很难实现磁源参数的有效反演[2]。

在磁法反演中，还有一些方法可以快速完成地质体位置参数的计算，这类方法中常用的有欧拉反褶积法[3-5]、归一化总梯度法[6-8]及人机交互反演法[9,10]。Euler 反褶积法可以快速反演出场源的位置及类型，但该方法灵敏度较高，导数计算结果稍有偏差，便会在反演中产生较大的偏离，从而影响边界位置的反演精度。重力归一化总梯度及其相位法也可以确定场源的深度和边界的水平位置，但此法受谐波数、向下延拓的影响，使场源深度和水平位置的估计受到了一定限制，因此精度不高。人机交互反演法可以在充分考虑地质资料和物性信息条件下完成地质模型的构建，但地质模型效果的好坏过多取决于解释人员的经验。

Tilt-depth 法是 Salem 等[11]在 Nabighian[12]提出的磁场通用梯度公式基础上，结合 tilt angle 法[13]推导出来的。该方法具有较强的灵活性和实用性，易于实现、结果直观，可以在无地质约束信息下快速反演磁源的上顶埋深。2008 年，Salem 等[14]讨论了基于磁异常梯度的解释方法，并把 tilt-depth 法应用于纳米比亚中北部的航磁数据处理中。2009 年，Lee 等[15]讨论了 tilt-depth 法的应用前提，随后 Lahti 和 Karinen[16]讨论了磁异常幅值大小对深度反演的影响，并进一步分析了 tilt-depth 法的理论条件。2011 年，Fairhead 等[17]对 tilt-depth 法的应用效果进行了讨论，并应用于沉积盆地的结构划分与深度反演中。2016 年，Wang 等[18]提出了改进型 tilt-depth 法，解决了 tilt-depth 法无法反演场源中心深度和下底深度问题，并采用多特征点联合反演模式提高反演解的可靠性。目前，tilt-depth 法已经受到了国内外的广泛关注与应用[19-24]。本文在前人研究基础上，对 tilt-depth 法进行理论研究和模型分析，探讨方法适用性，分析反演结果可靠性，为实际资料处理结果提供有效的评价依据。

1　基本原理

1994 年，Miller 和 Singh 给出了 tilt 梯度的数学表达，该方法能够同时探测出不同深度的场源边界，其表达式为：

$$\theta = \tan^{-1}\left[\frac{\partial M}{\partial z} \Big/ \frac{\partial M}{\partial h}\right] \tag{1}$$

式中：$\frac{\partial M}{\partial h} = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2}$，$\frac{\partial M}{\partial x}$、$\frac{\partial M}{\partial y}$、$\frac{\partial M}{\partial z}$ 分别为磁异常强度 M 沿 x、y、z 三个方向的一阶导数。

1972 年，Nabighian 在提出通用二度体磁异常公式基础上，推导出了磁异常的水平导数和垂向导数公式：

$$\frac{\partial M}{\partial h} = 2KFc\sin d\,\frac{z_c\cos(2I-d-90)+h\sin(2I-d-90)}{h^2+z_c^2} \tag{2}$$

$$\frac{\partial M}{\partial z} = 2KFc\sin d\,\frac{h\cos(2I-d-90)+z_c\sin(2I-d-90)}{h^2+z_c^2} \tag{3}$$

式中：k 为磁化率；F 为当地地球磁场值；$c = 1-\cos^2 i\cdot\sin^2 A$（$A$ 为测线磁方位角，i 为地磁倾角）；I 为有效磁化倾角；d 为地质体倾斜角；h 为台阶上顶埋深。

对于垂向磁化、垂直分布地质体的磁异常，其导数值可简化为：

$$\frac{\partial M}{\partial h} = 2KFc\,\frac{z_c}{h^2+z_c^2} \tag{4}$$

$$\frac{\partial M}{\partial z} = 2KFc\,\frac{h}{h^2+z_c^2} \tag{5}$$

将（4），（5）代入（1）得：

$$\theta = \tan^{-1}\left[\frac{h}{z_c}\right] \tag{6}$$

由式（6）可知，tilt 梯度上 +45°和 -45°之间的水平距离恰是场源上顶埋深 z_c 的 2 倍，因此可以利用这两个特征点水平距离的一半估计磁源上顶埋深。但该方法使用的模型体是单一直立分布，且宽度及下底深部趋于无穷的二度板状体。显然，实际地质体的分布难以满足这些苛刻条件。因此，探讨场源上顶、下底埋深和水平尺度等参数对 tilt-

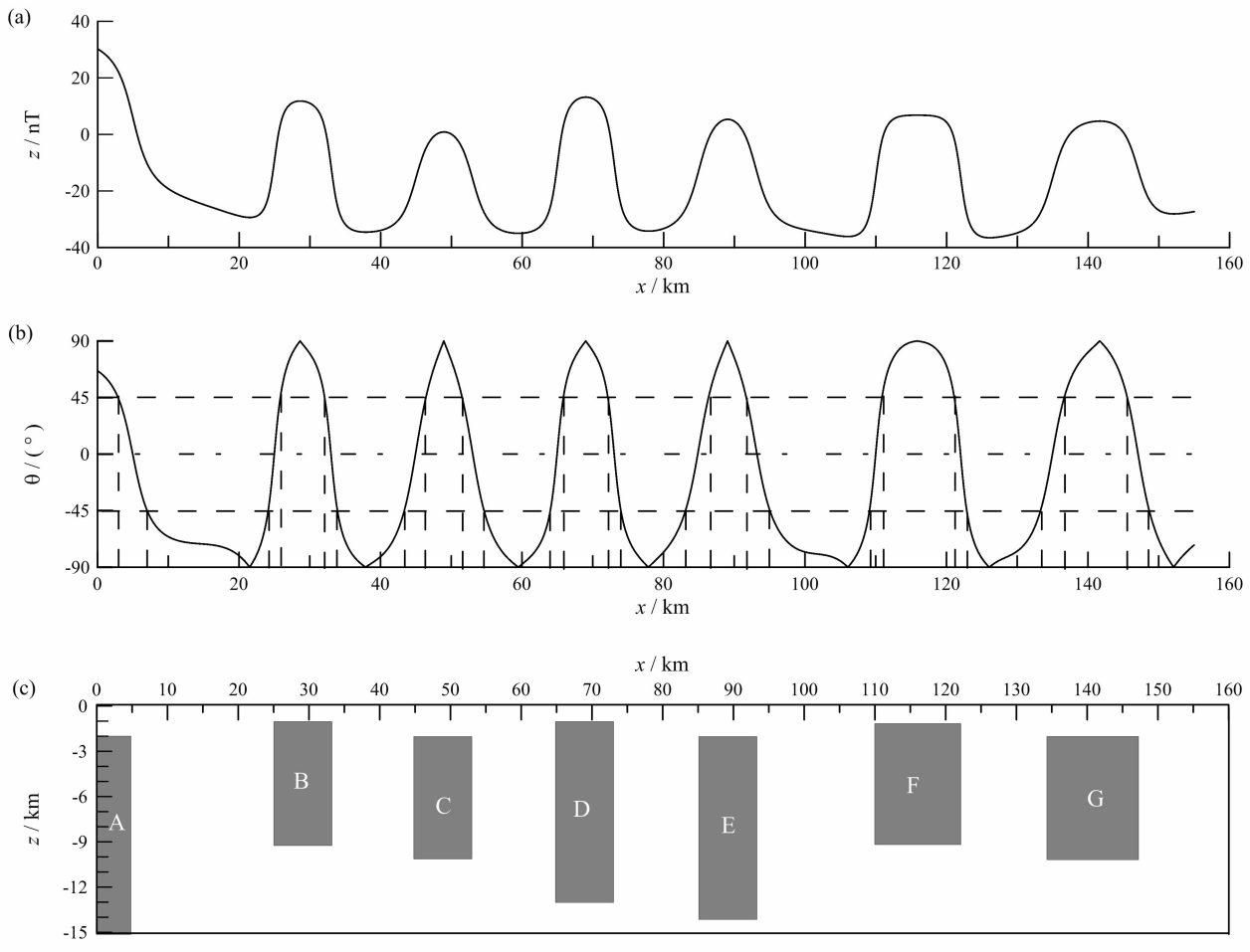
depth 法的影响具有重要研究意义。

2 模型检验

为了验证 tilt-depth 法的适用性问题，本文设计了一个二维和一个三维组合模型。

图 1a 和图 1b 是由 7 个不同参数模型体构成组合模型体的叠加垂直磁化磁异常和磁异常 tilt 梯度，各个模型体的相对位置及深度参数见图 1c 和表 1。利用 +45°和 −45°之间水平距离得到的模型体上顶深度值及与理论值的误差见表 1。可以看出，tilt-depth 法对于无限长、下底无限深的模型（模型 A），反演效果较为理想；通过对比模型 B 和 C、D 和 E 及 F 和 G，可以发现当地质体水平尺度相同时，tilt-depth 法的反演误差随着地质体上顶埋深的加深而增加；对比模型 B 和 F 及 C 和 G，可以看出，当地质体上顶、下底埋深相同时，tilt-depth 法反演误差随着地质体水平尺寸的增加而减小；对比模型 B 和 D 及 C 和 E，发现当模型宽度和上顶深度一样时，tilt-depth 法在较厚地质体上的反演效果较好。由此可知，地质体的宽度、深度及厚度均会对 tilt-depth 法反演结果产生影响。

三维组合模型由 4 个不同参数的长方体组成，模型体参数值见表 2，每个模型体的磁化强度均为 0.1 A/m，磁性体产生的垂直磁化磁异常如图 2a 所示，图 2b 是对应的 tilt 梯度图。利用 tilt-depth 法反演得到的上顶深度及相对误差见表 2。从表 2 中可以看出，tilt-depth 法反演误差同样与地质体的上顶深度、水平尺度及厚度有关；同一地质体不同



（a）组合模型垂直磁化磁异常；（b）Tilt 梯度；（c）模型体示意图.

图 1 二维组合模型正演计算结果

Fig. 1 Forward calculation of 2D combined model

表 1　二维组合模型反演结果

Table 1　Inversion results of 2D combined model

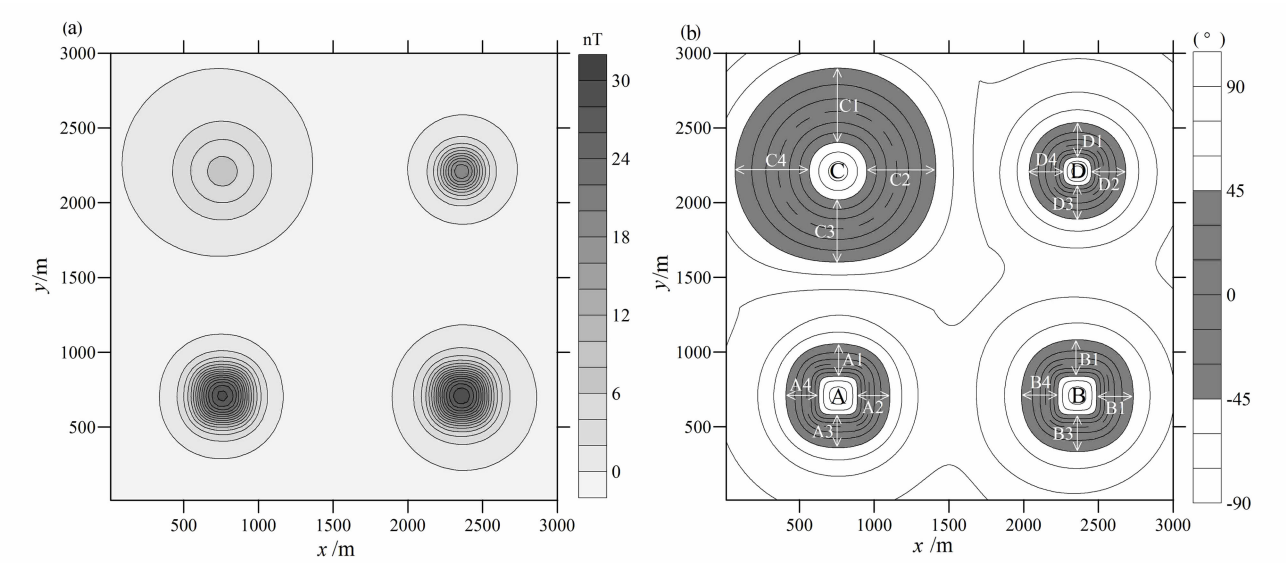
地质体编号		理论值 /km	tilt-depth /km		平均相对误差
			左边界	右边界	
A	上　顶	2	—	2.065	3.25%
	下　底	—	—	—	
B	上　顶	1	0.865	0.905	11.50%
	下　底	9	—	—	
C	上　顶	2	1.53	1.55	23.00%
	下　底	10	—	—	
D	上　顶	1	0.93	0.92	7.50%
	下　底	13	—	—	
E	上　顶	2	1.63	1.695	16.88%
	下　底	14	—	—	
F	上　顶	1	0.9	0.9	10.00%
	下　底	9	—	—	
G	上　顶	2	1.7	1.55	18.75%
	下　底	10	—	—	

表 2　三维组合模型反演结果

Table 2　Inversion results of 3D combined model

地质体编号	上顶/下底埋深/m	长 × 宽/m	tilt-depth/m		平均反演深度/m	相对误差/%
A	100/700	300 × 300	A1	108.5	110.3	10.3
			A2	110.3		
			A3	111.3		
			A4	111.2		
B	100/1000	300 × 300	B1	123.0	123.7	23.7
			B2	125.5		
			B3	123.4		
			B4	122.7		
C	300/900	300 × 300	C1	248.4	234.8	21.8
			C2	232.4		
			C3	208.9		
			C4	249.4		
D	100/700	200 × 200	D1	115.2	114.3	14.3
			D2	115.1		
			D3	112.8		
			D4	114.0		

位置的反演结果也有所偏差，这则是叠加异常相互影响引起的。对比模型体 A 和 B 发现，反演误差并非像二维模型那样随着地质体厚度的增加而减小，为了深入探究这一问题，通过改变单体模型的水平尺度和厚度，研究三维地质体水平尺度和厚度之间的相关性对 tilt-depth 法反演结果的影响。



（a）垂直磁化磁异常；（b）Tilt 梯度.

图 2 三维组合模型正演计算结果

Fig. 2 Forward calculation of 3D combined model

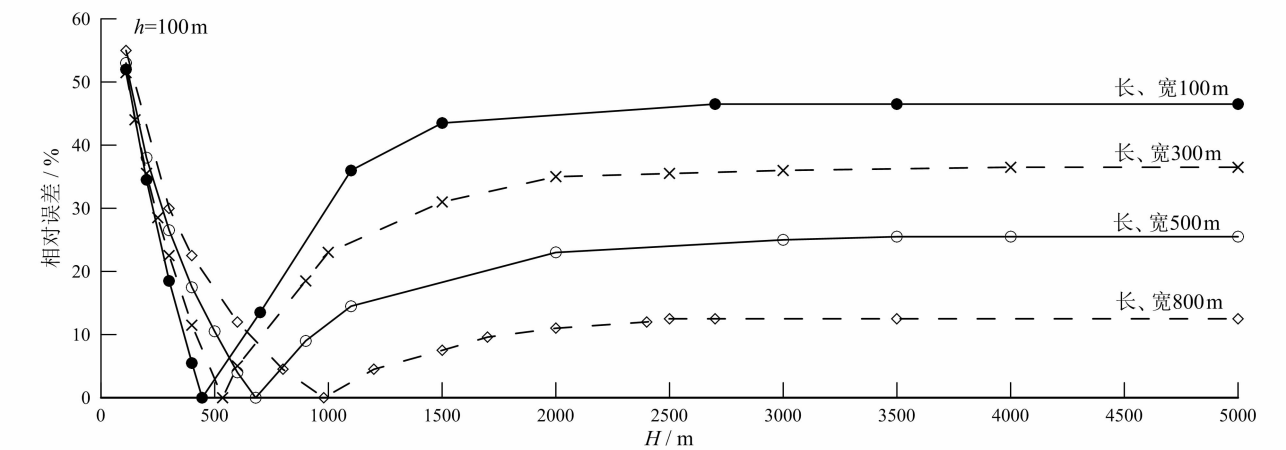
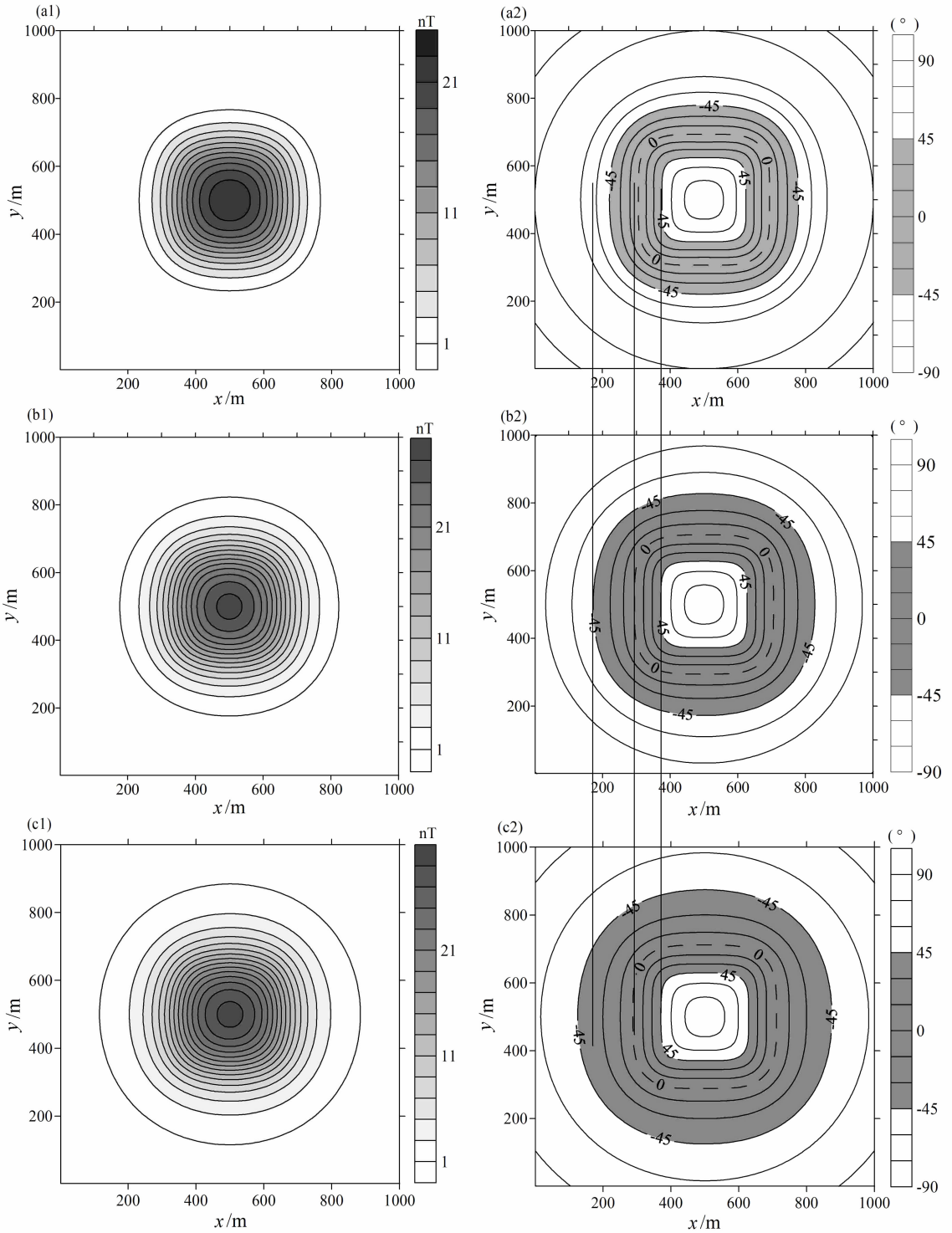


图 3 Tilt-depth 反演误差与水平尺度和下底埋深的关系曲线

Fig. 3 Relationship between tilt-depth inversion error and horizontal-scale and bottom depth

图 3 是模型体上顶埋深固定，不同水平尺度下，tilt-depth 反演误差随下底深度的变化曲线，图 4 是上顶深度及尺度大小相同，厚度不同的 3 个模型体垂直磁化磁异常及其 tilt 梯度图。从图 3 和图 4 可以看出，当磁性体上顶深度和水平尺度固定时，tilt-depth 法反演误差随着下底深度的增加先减小后增加，并且当下底埋深达到一定深度时，反演误差几乎不随下底深度增加而变化；当下底深度较大时，tilt-depth 反演误差随着地质体水平尺度的增加而减小；当下底深度较小时（图 4a2），tilt-depth 反演结果明显小于理论值，而当下底深度较大时（图 4c2），则反演值显著大于理论值；tilt 梯度图上的零值与 -45° 的水平距离随着下底深度的增加而增大，但零值与 +45° 的水平距离与下底深度相关性并不大。由此可知，tilt-depth 法的反演误差与地质体的水平尺度和厚度之间的相关性有



（a1）、（a2）是下底深度为 300 m 的磁异常及 tilt 梯度（tilt-depth 反演误差为 22.5%）；（b1）、（b2）是下底深度为 535 m 的磁异常及 tilt 梯度（tilt-depth 反演误差为 0.0%）；（c1）、（c2）是下底深度为 1 000 m 的磁异常及 tilt 梯度（tilt-depth 反演误差为 23.0%）.

图 4　单一模型体垂直磁化磁异常及 tilt 梯度（模型体上顶埋深 100 m，长和宽均为 300 m）

Fig. 4　Magnetic anomaly of vertical magnetization and its tilt map for a single model with top depth of 100 m and both length and width of 300 m

关，而当 tilt 梯度图上 0 值与 −45°值的水平距离明显大于 0 值与 +45°水平距离时，建议选择 0 值与 +45°值的水平距离作为上顶深度估计值。

3 广东下庄矿田实例应用

下庄矿田是中国重要的花岗岩型铀矿生产基地，为中国天然铀资源开发、利用做出了重要贡献[25]。下庄矿田位于贵东复式花岗岩体东部，大地构造位于华夏古陆西缘及闽赣后加里东隆起带西南缘与湘、桂、粤北海西—印支坳陷交接部位。矿田内岩浆活动具有多期次特点，主体花岗岩为多期侵入体。除花岗岩外，矿田内中基性岩脉极为发育，沿 EW 向深大断裂形成近东西向辉绿岩脉组（图 5）。矿田中的典型“交点”型铀矿床（辉绿岩脉与断裂构造交汇处）品位富，是下庄矿田的重要产铀区。然而，下庄矿田铀矿勘查平均深度只有 300 m，深部勘查程度严重不足，浅部出露地表的辉绿岩脉基本上在 50 m 宽度以内，岩脉深部延伸情况及分布规模目前还不清楚，发现的“交点”型铀矿床由于岩脉宽度限制而规模不大。为了解该地区的基性岩深部展布及埋深情况，收集了该地区的区域航磁数据。

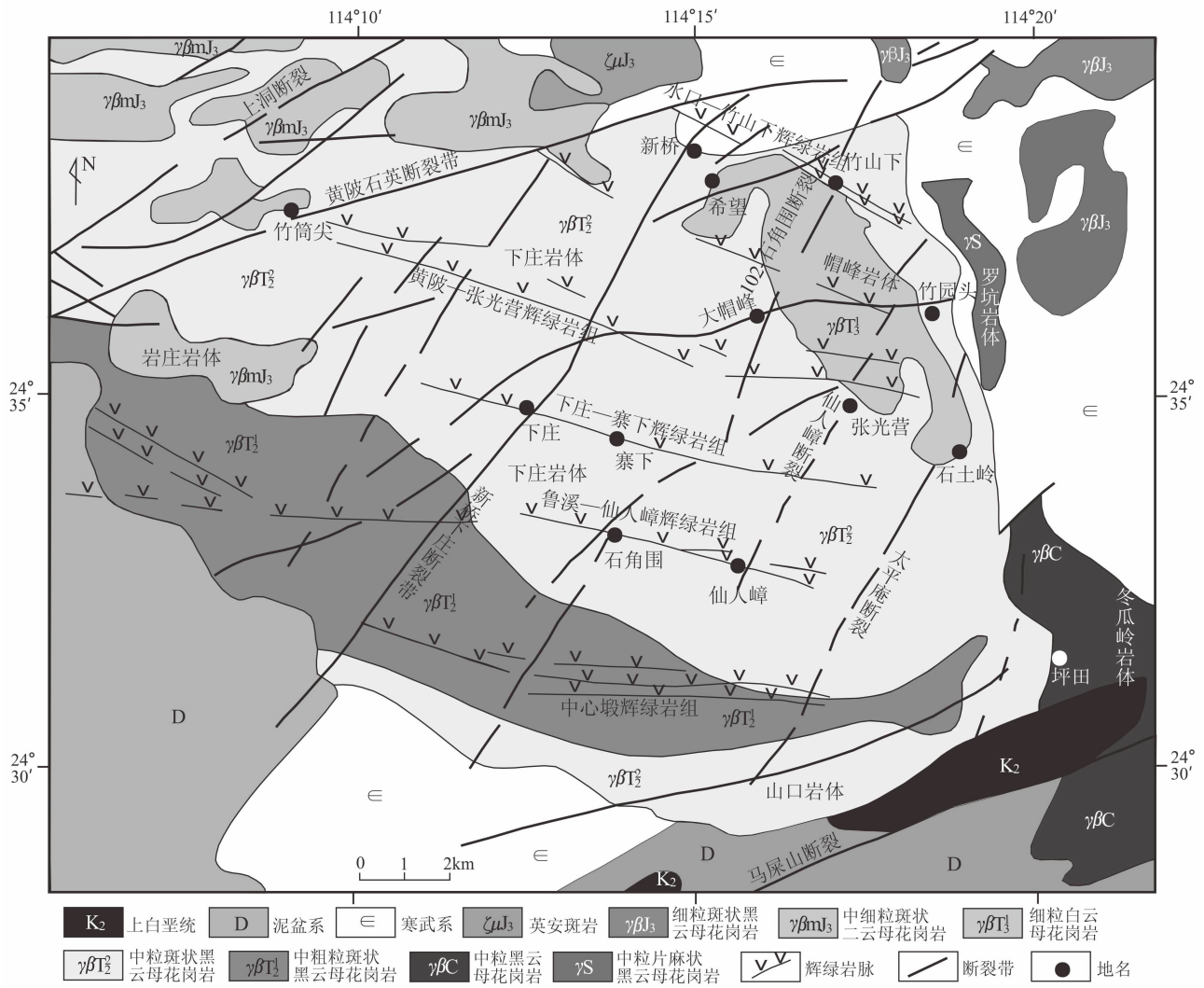
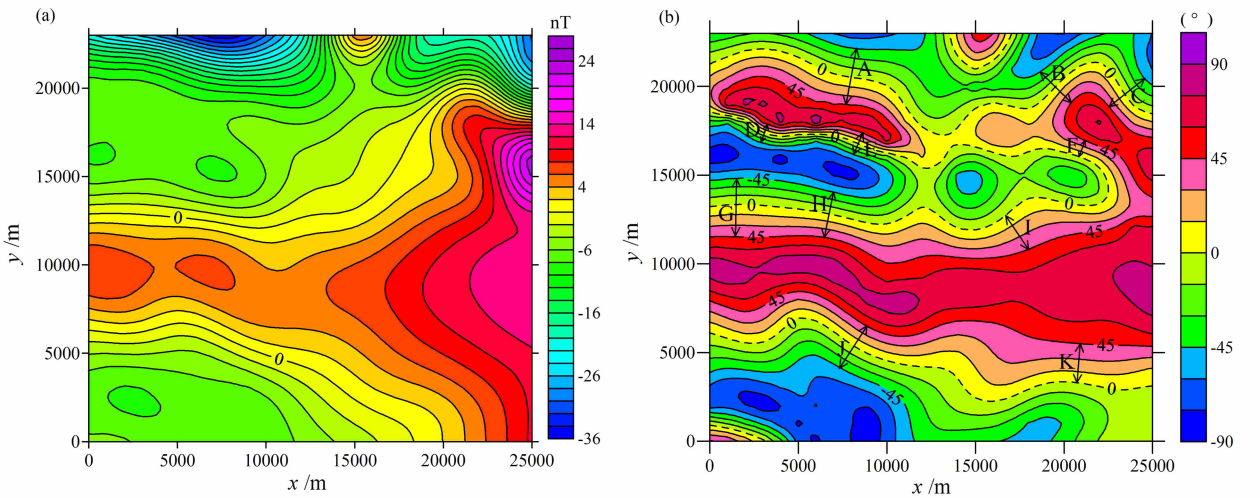


图 5 下庄铀矿田地质略图[26]

Fig. 5 Geology sketch map of Xiazhuang uranium ore field

查阅资料发现下庄矿田内的主体岩石花岗岩磁化率为 0.02×10^{-3} SI，为弱磁性物质；基性辉绿岩磁化率为 1.21×10^{-3} SI，为强磁性体，因此可认为该地区的高磁异常与辉绿岩有关。图 6a 是下庄矿田网格点距 1 000 m 的航磁化极异常，图 6b 是化极磁异常的 tilt 梯度，图 6b 中展示出了两条明显的近东西走向高磁异常带，推断可能是浅部基性辉绿岩脉在深部汇聚形成的，同时利用 tilt-depth 法反演出了 11 个计算点的上顶深度。通过对这些反演点的数据分析发现，北侧条带磁性体上顶深度在 550 ~ 1 600 m，呈现南浅北深的特征，依据 tilt 梯度图上零值线的水平距离得到磁性体宽度在 700 ~ 4 200 m；南侧条带磁性体规模较大且埋深较厚，上顶埋深均在 1 000 m 以下，局部可达 2 300 m。

综上所述，笔者认为在下庄矿田应首先开展大比例尺高精度地面磁测工作，验证航磁异常，其次在北侧高磁异常区（磁性体埋深较浅）与深大断裂交汇处布设钻孔验证，为深部 大型“交点型”铀矿床的存在提供可行性评价。



（a）化极磁异常；（b）Tilt 梯度图.

Tilt-depth 反演得到：h_A = 1 617 m，h_B = 1 263 m，h_C = 1 288 m，h_D = 556 m，h_E = 661 m，h_F = 980 m，h_G = 1 636 m，h_H = 1 304 m，h_I = 2 320 m，h_J = 1 430 m，h_K = 2 261 m.

图 6　下庄铀矿田航磁处理结果

Fig. 6　Aeromagnetic data processing results of Xiazhuang ore field

4　结论

（1）地质体的上顶埋深、水平尺度及厚度均会对 tilt-depth 法的反演结果产生影响，tilt-depth 法不适用于埋深大且水平尺度小地质体的反演计算。

（2）不同地质体产生的叠加异常对 tilt-depth 法反演结果也会产生影响，当地质体之间距离较近时，tilt-depth 法的反演效果较差。

（3）当 tilt 梯度图上 0 值与 −45°值之间水平距离明显大于 0 值与 +45°的水平距离时，选择 0 值与 +45°值之间水平距离作为上顶深度估计值的准确性更高。

参考文献：

[1] 张恒磊，刘天佑，杨宇山. 各向异性标准化方差计算重磁源边界 [J]. 地球物理学报，2011，54（7）：1921-1927.
ZHANG Heng-lei，LIU Tian-you，YANG Yu-shan. Calculation of gravity and magnetic source boundary based on anisotropy normalized variance [J]. Chinese Journal of Geophysics，2011，54（7）：1921-1927.

[2] 张恒磊，胡祥云，刘天佑. 基于二阶导数的磁源边界与顶部深度快速反演 [J]. 地球物理学报，2012，55（11）：3839-3847.
ZHANG Heng-lei，HU Xiang-yun，LIU Tian-you. Fast inversion of magnetic source boundary and top depth via

second order derivative [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55 (11): 3839-3847.

[3] Thompson D T. EULDPH: a new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data [J]. Geophysics, 1982, 47: 31-37.

[4] Reid A B, Allsop J M, Granser H, et al. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution [J]. Geophysics, 1990, 55: 80-91.

[5] 任秀艳, 杜晓娟, 孙瑞雪, 等. 地面磁梯度测量在勘查地下污水管道中的应用 [J]. 世界地质, 2014, 33 (3): 659-665.
REN Xiu-yan, DU Xiao-juan, SUN Rui-xue, et al. Application of ground magnetic gradient in underground sewage pipe survey [J]. Global Geology, 2014, 33 (3): 659-665.

[6] 张凤旭, 孟令顺, 张凤琴, 等. 利用 Hilbert 变换计算重力归一化总梯度 [J]. 地球物理学报, 2005, 48 (3): 704-709.
ZHANG Feng-xun, MENG Ling-shun, ZHANG Feng-qin, et al. Calculating normalized full gradient of gravity anomaly using Hilbert transform [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48 (3): 704-709.

[7] 郭灿灿, 张凤旭, 王彦国, 等. 基于泰勒级数迭代的重力归一化总梯度 [J]. 世界地质, 2012, 31 (4): 824-830.
GUO Can-can, ZHANG Feng-xu, WANG Yan-guo, et al. Calculating normalized full gradient of gravity anomalies using Taylor series iteration [J]. Global Geology, 2012, 31 (4): 824-830.

[8] 苏超, 杜晓娟, 马国庆, 等. 几何平均重力归一化总梯度在山东招远金矿采空区的应用 [J]. 世界地质, 33 (4): 889-894.
SU Chao, DU Xiao-juan, MA Guo-qing, et al. Application of normalized full gradient method with geometric mean in mined-out area of Zhaoyuan gold deposit in Shandong [J]. Global Geology, 2014, 33 (4): 889-894.

[9] 王予, 薛林福, 彭冲, 等. 鞍山-本溪地区太古宙结晶基底埋深 [J]. 世界地质, 2016, 35 (2): 387-394.
WANG Yu, XUE Lin-fu, PENG Chong, et al. Buried depth of Archean crystalline basement in Anshan-Benxi area [J]. Global Geology, 2016, 35 (2): 387-394.

[10] 于清水, 张凤旭, 曾昭发. 大兴安岭北段的地球物理场研究 [J]. 世界地质, 2016, 34 (1): 187-193.
YU Qing-shui, ZHANG Feng-xu, ZENG Zhao-fa. Research on geophysical field in northern part of Da Hingan mountains [J]. Global Geology, 2016, 34 (1): 187-193.

[11] Salem A, Williams S E, Fairhead J D, et al. Tilt-depth method: a simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives [J]. The leading Edge, 2007, 26: 1502-1505.

[12] Nabighian M N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation [J]. Geophysics, 1972, 37 (3): 507-517.

[13] Miller H G, Singh V. Potential field tilt: a new concept for location of potential field sources [J]. Journal of Applied Geophysics, 1994, 32: 213-217.

[14] Salem A, Williams S E, Fairhead J D, et al. Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives [J]. Geophysics, 2008, 73 (1): 1-10.

[15] Lee M, Morris W, Ugalde H. Amplitude effects of magntic signals on depth estimations [C]. 11th SAGA Biennial Technical Meeting and Exhibition, Swaziland, 2009 (16/18): 276-279.

[16] Lahti I, Karinen T. Tilt derivative multiscale edges of magnetic data [J]. The Leading edge, 2010, 29 (1): 24-29.

[17] Fairhead J D, Salem A, Cascone L, et al. New developments of the magnetic tilt-depth method to improve structural mapping of sedimentary basins [J]. Geophysical Prospecting, 2011, 59 (6): 1072-1086.

[18] WANG Yan-guo, ZHANG Jin, GE Kun-peng, et al. Improve tilt-depth method for fast estimation of top and bottom depths of magnetic bodies [J]. Applied Geophysics, 2016, 13 (2): 249-256.

[19] 郭华, 熊盛青, 于长春. Tilt-depth 方法的应用 [J]. 物探与化探, 2009, 33 (5): 583-586.
GUO Hua, XIONG Sheng-qing, YU Chang-chun. The application of tilt-depth technology [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 33 (5): 583-586.

[20] Salem A, Williams S E, Samson E, et al. Sedimentary basins reconnaissance using the magnetic tilt-depth method [J]. Exploration Geophysics, 2010, 41: 198-209.

[21] 郭华, 王平, 谢汝宽. 利用 Tilt-depth 求取埋藏深度及其边界位置的关系研究 [J]. 地球物理学进展, 2012, 27 (5): 2151-2159.
GUO Hua, WANG Ping, XIE Ru-kuan. The relationship of the boundary and the depth computed with the method of tilt-depth [J]. Progree in Geophysics, 2012,

27 (5)：2151-2159.

[22] Cooper G R J. A gradient-ratio method for the semi-automatic interpretation of gravity map data sets [J]. Geophysical Prospecting, 2012, 60：995-1000.

[23] Zhou S, Huang D N. Determining the depth of certain gravity sources without a priori specification of their structural index [J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 122：172-180.

[24] Cooper G R J. The automatic determination of the location, depth, and dip of contacts from aeromagnetic data [J]. Geophysics, 2014, 79 (3)：35-41.

[25] 赖中信，王连训，周锐，等. 下庄矿区铀成矿条件及找矿新思路 [J]. 铀矿地质，2010，26 (5)：277-282.
LAI Zhong-xin, WANG Lian-xun, ZHOU Rui, et al. Metallogenic and new prospecting direction for Xiazhuang uranium mine area [J]. Uranium Geology, 2010, 26 (5)：277-282.

[26] 何德宝，范宏海，汪昱. 下庄铀矿田成矿模式 [J]. 铀矿地质，2016，32 (3)：152-158.
HE De-bao, FAN Hong-hai, WANG Yu. Metallogenic model in Xiazhuang uranium ore field [J]. Uranium Geology, 2016, 32 (3)：152-158.

(上接 559 页)

[25] 刘建章，陈红汉，李剑，等. 运用流体包裹体确定鄂尔多斯盆地上古生界油气成藏期次和时期 [J]. 地质科技情报，2005，24 (4)：60-66.
LIU Jian-zhang, CHEN Hong-han, LI Jian, et al. Using fluid inclusion of reservoir to determine hydrocarbon charging orders and times in the Upper Paleozoic of Ordos Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2005, 24 (4)：60-66.

[26] 李占东，马金龙，刘文超，等. 鸡西盆地梨树镇坳陷晚白垩世构造演化与油气成藏条件 [J]. 大地构造与成矿学，2011，35 (1)：47-53.
LI Zhan-dong, MA Jin-long, LIU Wen-chao, et al. Cretaceous structure evolution and oil and gas pooling of the Lishu Town depression, Jixi Basin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35 (1)：47-53.

[27] 刘欣. 鸡西煤盆地构造演化初探 [J]. 黑龙江科学，2016 (7)：142-143.
LIU Xin. Tectonic evolution of Jixi coal basin [J]. Heilongjiang Science, 2016 (7)：142-143.

[28] 王珊. 鸡西盆地早白垩世城子河组—穆棱组沉积体系分析：硕士学位论文 [D]. 武汉：中国地质大学，2012.
WANG Shan. Depositional system analysis of Early Cretaceous Chengzihe – Muling formation in Jixi Basin, northeastern China：master's degree thesis [D]. Wuhan：China University of Geosciences, 2012.