doi:10.3799/dqkx.2017.044

二连盆地巴音都兰凹陷反转构造及成因机制

陈树光[1,2],张以明[1],崔永谦[1],肖 阳[1],秦凤启[1],吕德胜[1],祖志勇[1],李 勇[1]

1.中国石油华北油田公司地球物理勘探研究院,河北任丘 062552
2.中国石油大学地球科学学院,北京 102249

摘要:二连盆地的构造反转事件一直有争议.为了查明二连盆地巴音都兰凹陷早白垩世期间反转构造的发育期次以及不同时期发生反转构造的动力机制,利用新处理的覆盖全凹陷的3D地震数据和钻井资料,识别并分析了研究区在裂陷期发育的4期正反转构造,分别对应阿三段沉积末期、阿四段沉积末期、腾一下段沉积末期以及腾二段沉积期.研究表明:研究区早白垩世岩浆底辟较为活跃,在阿三段、阿四段和腾一下段以及腾二段沉积末期均发育过岩浆底辟活动,并导致盆地局部发生构造正反转,而腾二段沉积期间除了发育岩浆底辟作用导致构造反转外,还发育左旋压扭活动,并导致构造正反转.因此,研究区在早白垩世发育了两种不同成因类型的正反转构造,这主要与二连盆地在早白垩世期间伊泽纳琦板块对欧亚大陆的俯冲和异常地幔隆升引起的岩浆底辟作用以及腾二段沉积期伊泽纳琦板块俯冲方向发生改变而导致的区域走滑作用密切相关.

关键词:巴音都兰凹陷;早白垩世;反转构造;成因机制;石油地质.
中图分类号:P618.13 **文章编号**:1000-2383(2017)04-0559-11 **收稿日期**:2016-10-22

The Inversion Structures and Their Genetic Mechanisms of Bayindulan Sag, Erlian Basin

Chen Shuguang[1,2], Zhang Yiming[1], Cui Yongqian[1], Xiao Yang[1], Qin Fengqi[1], Lü Desheng[1], Zu Zhiyong[1], Li Yong[1]

1. *Geophysical Exploration Research Institute, Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu* 062552, *China*
2. *College of Geosciences, China University of Petroleum Beijing, Beijing* 102249, *China*

Abstract: The Geologic structure of Erlian basin has been controversial. To make clear the developmental periods of inversion structure and their genetic dynamic mechanism of Bayindulan sag, Erlian basin in Early Cretaceous, we make use of the new processing of 3D seismic data covering the all sag to identify the important tectonic unconformity interfaces and to make sure the contact relationship between the strata developed in Early Cretaceous. Combined the igneous rock revealing in drilling data, we think that the late 3rd Member of K_1ba Formation, and the late 4th member of K_1ba Formation, the late K_1bt_1, and the late K_1bt_2 mainly all developed normal inversion structures. The further studies indicate that the four positive inversion structures in the Early Cretaceous were caused by the developing magmatic diapiric structure under the setting of the regional extensional stress field; while inversion structure in early K_1bt_2 was typically caused by the regional strike-slip movement. Therefore, the genetic mechanisms of various inversion structures developed in different periods are dissimilar, which was closely coordinated with the subduction of Paleo-Pacific plate to Eurasia, the effects of the magmatic diapiric caused by the metasomatic mantle and regional strike-slip action resulted by the change of subduction direction of Paleo-Pacific plate during the Early Cretaceous period.

Key words: Bayindulan sag; Early Cretaceous; inversion structure; genetic mechanism; petroleum geology.

反转构造主要指构造运动(或位移)极性发生倒转过程中形成的叠加构造变形现象(漆家福等,2007).20世纪80年代初,随着构造地质学的发展和油气勘探中3D地震技术的应用与普及,反转构

基金项目:国家重大科技专项(No. 2011ZX05009-002);中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(No. 2014E-35);中石油华北油田公司博士后科研课题(No. 2016-HB-L01).
作者简介:陈树光(1984-),男,博士后,主要从事含油气盆地分析与储层预测工作. ORCID:0000-0003-1234-6319. E-mail: chshg661@126.com

引用格式:陈树光,张以明,崔永谦,等,2017.二连盆地巴音都兰凹陷反转构造及成因机制.地球科学,42(4):559-569.

造开始引起地质学家的广泛关注和高度重视，相继提出了反转构造(inversion tectonics)的概念并丰富了其内涵(Harding，1985；Cooper *et al.*，1989；Eisenstadt and Withjack，1995；张功成，1996；王国纯，1998). 进入 21 世纪以来，石油地质工作者对反转构造的类型、几何学、运动学的定性、定量表征及对油气生成、聚集的影响等方面进行了较为深入探讨(Turner and Williams，2004；胡望水等，2007；Korsch *et al.*，2009；Buiter and Pfiffner，2009；Scisciani，2009；阳怀忠等，2009；Su *et al.*，2009；杨风丽等，2010；Bonini *et al.*，2012；孙永河等，2013；陈哲龙等，2015；陈树光等，2015；Shinn，2015). 二连盆地在早白垩世的发育演化过程中，经历了多次正反转构造事件，其中阿尔善组沉积末期、腾一段沉积末期以及腾二段末期的构造反转最为普遍，但盆地内不同凹陷反转活动的时间和期次不尽相同(赵贤正等，2016). 其中，易士威(2006)指出巴音都兰凹陷在阿三段沉积末期、腾一段沉积末期以及腾二段沉积末期各发生了一次构造正反转，另外还认为在腾二段沉积期间发生过两次小规模的构造正反转. 位于巴音都兰凹陷北部的阿尔凹陷则主要在阿尔善组沉积末期，腾一下段沉积末期以及腾二段末期发生了 3 期较为显著的构造反转(赵贤正等，2016). 由于腾二段沉积期古太平洋板块向欧亚板块俯冲方向由北西向转为正北向并导致的区域左旋压扭的应力环境，使二连盆地发育了大量的走滑反转构造(李心宁和王同和，1997；肖安成等，2001). 而阿尔善组到腾一段沉积末期发生构造反转的成因机制的研究目前鲜有报道，另外对早白垩世期间发生的构造反转事件的期次也有待商榷. 因此，本文利用新的覆盖全盆地的 3D 地震资料，对早白垩世期间巴音都兰凹陷构造反转发育的时间、期次及成因机制进行了深入研究，对于重新认识二连盆地的构造演化过程、动力机制及提高油气勘探的成功率方面具有重要的理论和现实意义.

1 区域地质背景

二连盆地位于内蒙古自治区中部，东起大兴安岭隆起，西至索伦山隆起，南北分别为温都尔庙隆起和巴音宝力格隆起，是一个在海西褶皱基底上发育起来的中新生代断陷盆地(费宝生等，2001). 巴音都兰凹陷是二连盆地马尼特坳陷东北部的一个次级凹陷，其北面和西面与巴音宝力格隆起区相接，东南依布林凸起，西南邻阿拉坦合力凹陷. 该凹陷划分为南洼和北洼，其中南洼面积较大，构造演化复杂，发育

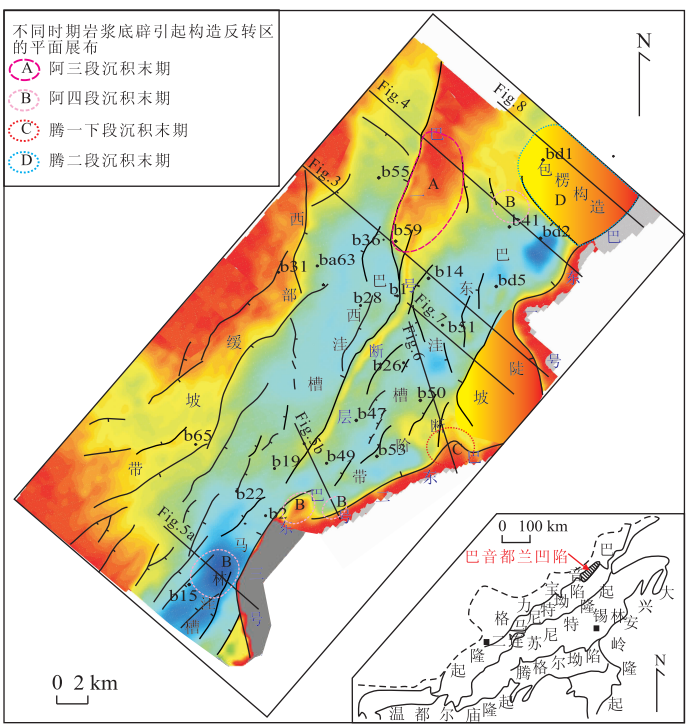

图 1 巴音都兰凹陷南部洼陷构造单元划分

Fig. 1 The distribution of tectonic units in the south sub-sag of Bayindulan sag

多期次的反转构造事件,而北洼盆地结构较为单一,构造较为简单,反转构造相对不发育. 因此,本文重点研究南洼的反转构造特征. 总体上,巴音都兰凹陷南洼具有东西分带,南北分区的特点. 凹陷由东向西可划分为东部陡坡断阶带、中部洼陷带和西部缓坡带. 其中,盆内巴一号断层又将中部洼陷带分割成东、西两部分(图 1).

2　层序地层格架

建立盆地统一的层序地层格架是研究盆地发育演化过程、实现地层等时对比的基础,也是明确反转构造发育时间和期次、探究构造演化成因机制的重要依据. 二连盆地早白垩世构造演化遵循中国东部裂陷盆地幕式构造运动的一般规律,即幕式构造运动与盆地的沉积充填具有良好的响应关系. 任建业等(1999)认为:一个裂陷期与盆地内部的一级层序相对应,并控制了盆地原型的构成;一个裂陷期内不同的裂陷幕控制了盆地原型内二级构造层序的发育;三级层序的发育受控于低级的幕式伸展事件. 此外,由于二连盆地早白垩世裂后期发育时间相对较短,地层较薄的特点,本次将二连盆地整个下白垩统作为一个一级构造层序,形成一个完整的裂陷到坳陷的构造演化旋回. 将裂陷期的 3 个裂陷幕加上裂后期划为 4 个二级构造层序,分别对应阿尔善组(K_1ba)、腾格尔组一段(K_1bt_1)和腾格尔组二段(K_1bt_2)以及赛汉塔拉组(K_1bs)构造层序. 在此基础上,结合巴音都兰凹陷发育的局部构造事件以及由此形成的构造不整合面特征,将 4 个二级构造层序细分为 7 个三级层序(图 2).

3　巴音都兰凹陷的反转构造

巴音都兰凹陷在早白垩世发生了多次构造反转事件,通过对地震资料构造不整合界面的识别,本次重点厘定了研究区在裂陷期发生的重要构造反转活动,分别对应阿三段沉积末期,阿四段沉积末期,腾一下段沉积末期以及腾二段沉积期. 通过这些不同时期

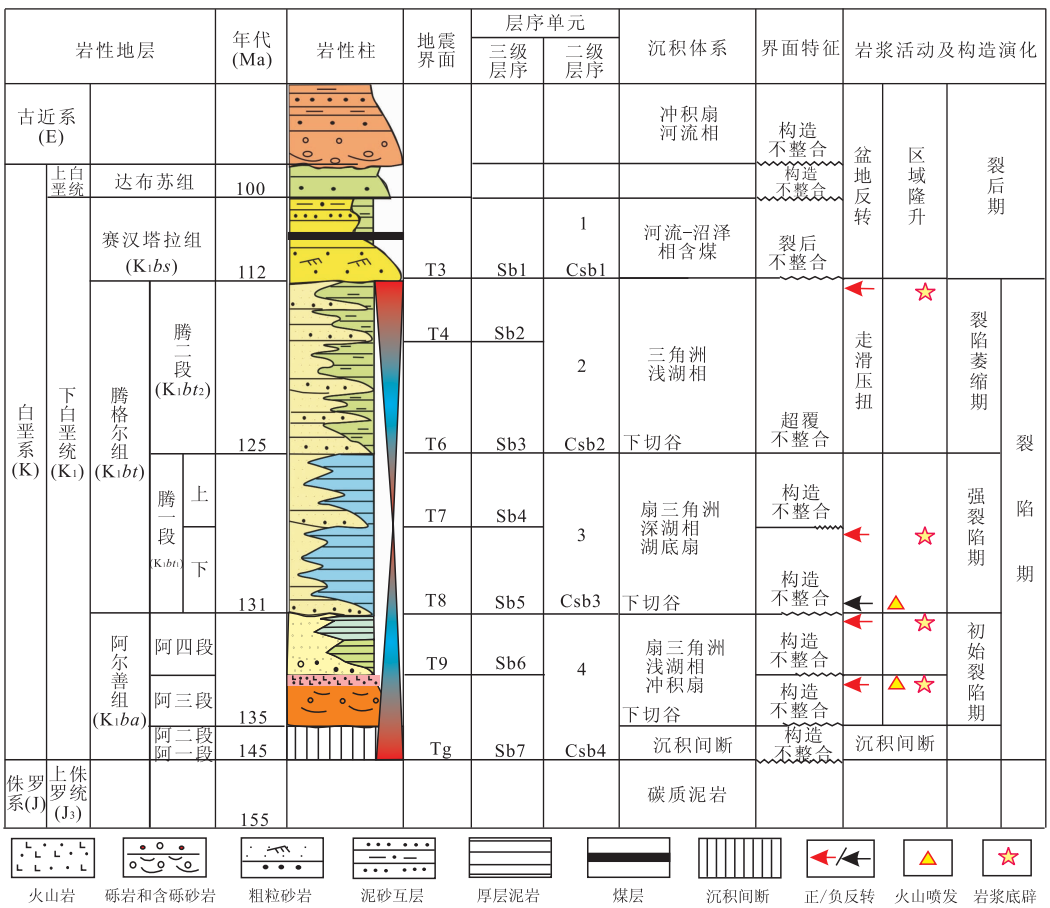

图 2　巴音都兰凹陷地层综合柱状图

Fig. 2　The synthesis columnar section of Bayindulan sag

发育的反转构造,我们可以进一步深化对二连盆地早白垩世裂陷期构造演化过程及其动力机制的认识.

3.1 阿三段沉积末期的反转构造

凹陷内部巴一号断层以 b59 井附近转弯处为界,可将巴一号断层划分为东、西两段. 其中,巴一号断层东段西侧(靠近 b59 井处)下盘阿三段发生显著的翘倾,并表现为高角度的削截(图 3),而沿着巴一号断层东段向西,其下盘阿三段表现为地垒形态,且阿四段向上超覆的现象(图 4),表明该地区在阿三段沉积末期很可能发生过一次隆升活动. 通过钻井资料分析,笔者发现位于巴一号断层西段的东侧的 b1 井钻遇到了上侏罗统变质岩和花岗岩,而 b59 井钻遇阿三段末期的安山岩(图 3),这表明在阿三段沉积末期沿着巴一号断层应该发生过岩浆活动,造成花岗岩侵入,并在热岩浆烘烤作用下,使早期沉积地层发生变质,局部穿透沉积地层,形成火山喷发(图 3),而在巴一号断层东段则形成岩浆底辟,导致断层下盘阿三段地层抬升,在火山喷发处表现为高角度翘倾,而向西远离火山口处表现为隆升的地垒形态,在阿四段沉积期表现为低隆起,从而发生超覆现象(图 4). 据此,笔者推断该时期在巴一号断层东段下盘发生了由岩浆底辟作用导致的构造反转活动.

3.2 阿四段沉积末期的反转构造

在一个正常连续沉积的断陷盆地里,盆地沉降

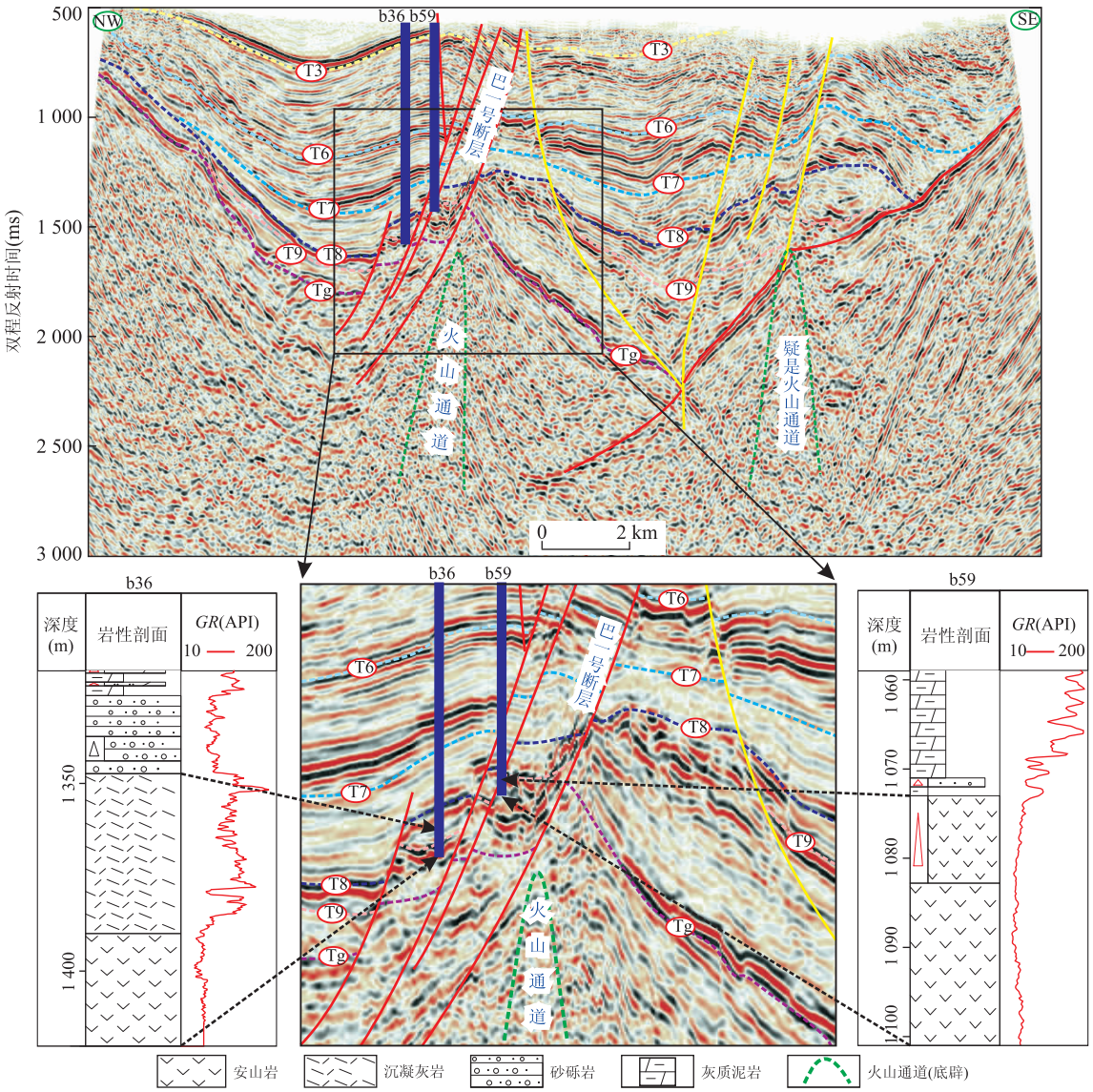

图 3 阿三段沉积末期火山喷发及反转构造

Fig. 3 The volcanic passageway and inversion structure in late K_1ba_3

平面位置见图 1

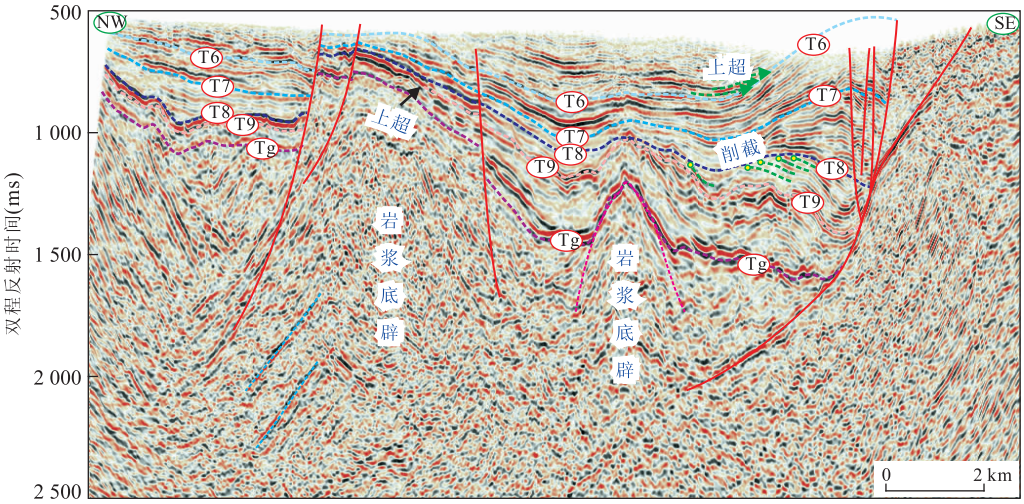

图 4　阿三段和阿四段沉积末期的岩浆底辟构造特征

Fig. 4　The magmatic diapiric structure feature in the late K_1ba_3 and the late K_1ba_4

平面位置见图 1

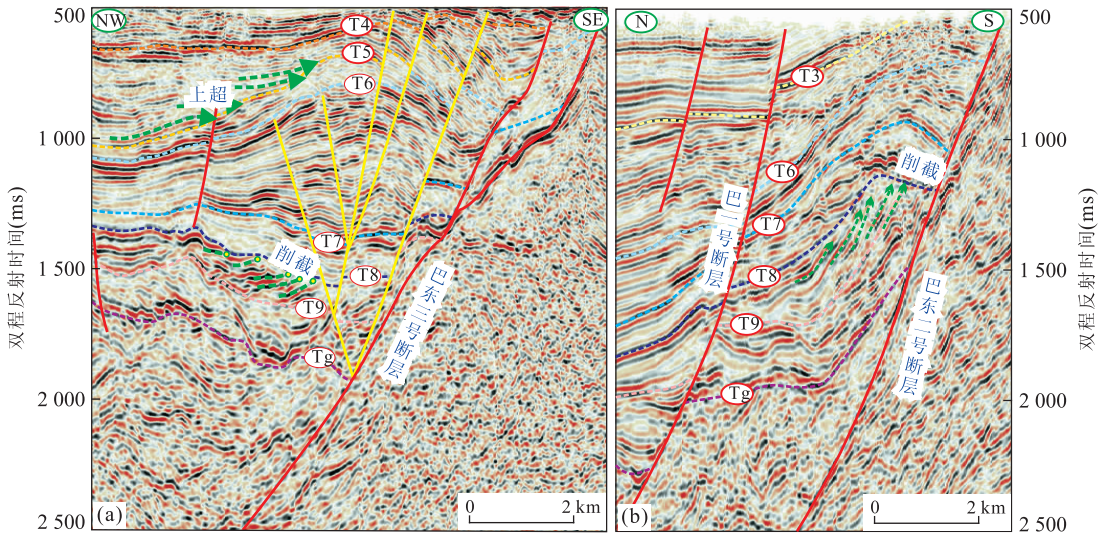

图 5　阿四段沉积末期的正反转构造特征

Fig. 5　The inversion structure feature in late Aershan Formation

平面位置见图 1

中心处在未发生明显迁移的情况下应发育相对整合接触的地层. 而在巴音都兰凹陷由巴东三号断层控制的沉降中心处,阿四段顶部发生严重削截,并形成高角度构造不整合界面(图 5a). 据此,笔者推测在阿四段沉积末期,该地区可能发生了一次构造正反转,使得盆地早期的沉降中心发生抬升、阿四段遭受严重剥蚀(图 5a). 另外,在巴东二号断层西段控制的早期沉降中心处,同样有阿四段顶部与腾一段之间形成明显的高角度构造不整合界面,而且阿四段表现为向上翘倾,而腾一段在断层附近表现为近水平展布(图 5b),表明该地区在阿四段沉积末期同样发生了一次挤压正反转构造. 从以上两处可能的正反转构造位置来看,均发生在控盆边界断裂处,且 3 处是孤立的,相互不连接,平面上表现为近椭圆形态,区域应力为伸展应力环境,所以应该不是板块挤压逆冲导致的构造反转. 此外,在包楞构造带西侧可看到明显的底辟构造形态,使阿三段沉积的砾岩层发生褶皱向上弯曲,似锥形,并使得阿四段沉积地层发生反转并遭受严重削截(图 4),而其平面展布表现为近圆形形态,因此,研究人员初步推断该构造样式应为岩浆底辟构造. 另外,该时期中国东北盆地群火山活动异常频繁,岩浆底辟作用时常发生. 从二连

盆地火山活动的展布来看，主要包括中心式、裂隙式和中心－裂隙式 3 种，而研究区以上 3 处构造反转事件很可能就是在中心－裂隙式（前两处）和中心式（包楞构造带西侧）的岩浆底辟作用下形成的.

3.3 腾一下段沉积期的反转构造

腾一下段沉积早期，盆内湖水显著加深，沉积物粒度明显变细，并沉积了一套较厚的稳定泥岩，而且控盆边界断裂全部表现为伸展正断，并控制着盆地的沉积. 从盆地构造演化阶段分析，该时期盆地的构造演化已进入强裂陷期. 因此，在阿四段沉积末期沿着控盆边界断裂发生过地层抬升并遭受剥蚀的地区（图 5a，5b），由于再次受到区域伸展拉伸作用影响，构造活动极性再次发生了反转，所以该时期沿控盆边界断裂发生过正反转的地区又经历了负反转构造的演化过程，并控制了腾一下段的沉积.

腾一下段沉积末期，巴音都兰凹陷东部巴东二号断层东段由北东东向转向近东西向的过渡地区，其阿尔善组和腾一下段沉积地层与层序界面呈近平行反射的结构特点，而且地层厚度从控盆边界断裂到盆内也未发生大的变化，由此笔者推测阿尔善和腾一下段沉积期盆内地层应是近水平展布的，而腾一上段地层却明显超覆于腾一下段的地层之上（图 6），且阿尔善组和腾一下段地层表现为高角度的倾斜形态. 由此笔者推测腾一下段沉积的末期该

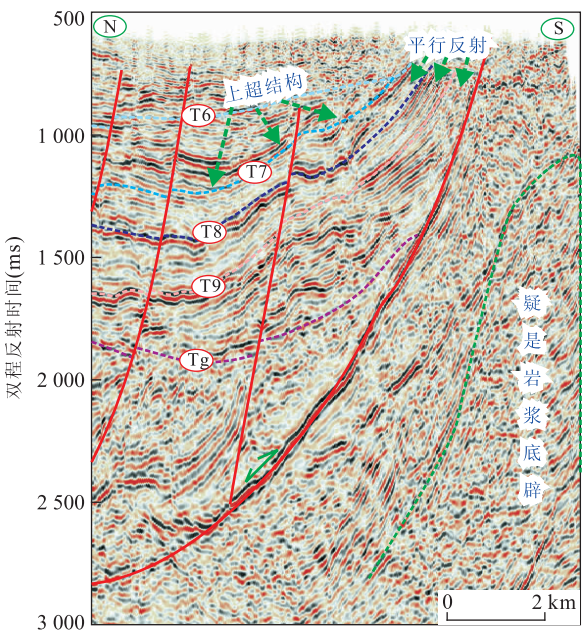

图 6 腾一下段沉积末期的反转构造特征

Fig. 6 The inversion structure feature in the lower 1st segment of Tenggeer Formation

平面位置见图 1

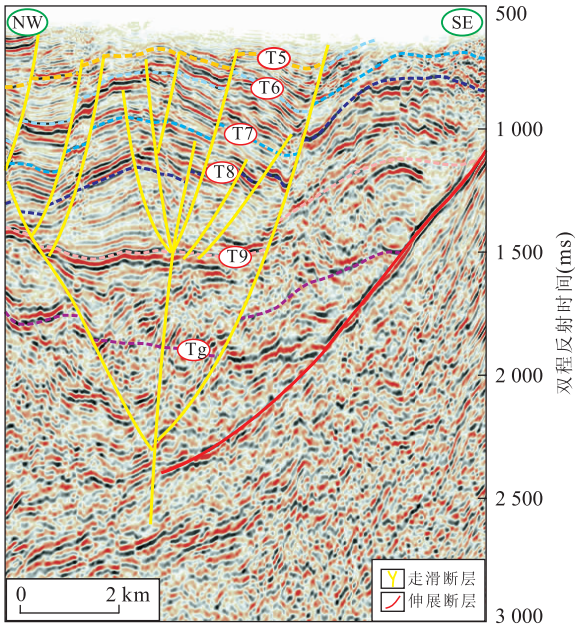

图 7 腾二段沉积期的反转构造特征

Fig. 7 The inversion structure feature in the 2nd segment of Tenggeer Formation

平面位置见图 1

地区应发生了一次较强的构造挤压引起的正反转构造事件，导致巴东二号断层上盘地层形成了高角度的正向结构特征. 另外，该时期反转构造的平面展布是沿着控盆边界断裂，且具有椭圆状的特点（图 7）. 而且从区域动力学角度分析，该时期盆地处于强伸展裂陷期，没有发生大规模挤压逆冲构造事件，因此，笔者推断该地区的正反转构造很可能与前两次正反转构造的成因一样，均是在中心－裂陷式的岩浆底辟作用下形成的.

3.4 腾二段沉积期的反转构造

腾二段沉积期发生了区域性构造变革，在整个中国东部地区均有响应（Yang *et al.*, 2014）. 在二连盆地巴音都兰凹陷局部地区表现为明显的左旋走滑活动迹象，尤其是走滑作用引起盆地东部控盆断层所控制的早期沉积中心的巨厚负向地层发生了显著的构造反转，形成了典型的背形负花状构造样式（图 5a，图 7），即主要指一束向上、向外撒开的正断距走滑断层所限定的，深部“向形”、浅部“背形”的构造样式（王国纯，1998；刘晓峰等，2010），平面上主要位于巴一号断层西部末端的马林洼陷和中东部的巴 51 井区，而巴 51 井区又处于巴一号断层走向开始发生显著变化的节点处（图 1）. 研究表明：巴一号断层在该时期具有走滑活动的特征，剖面上该断裂上部发育较为陡直，且局部地区发育负花状构造和挤

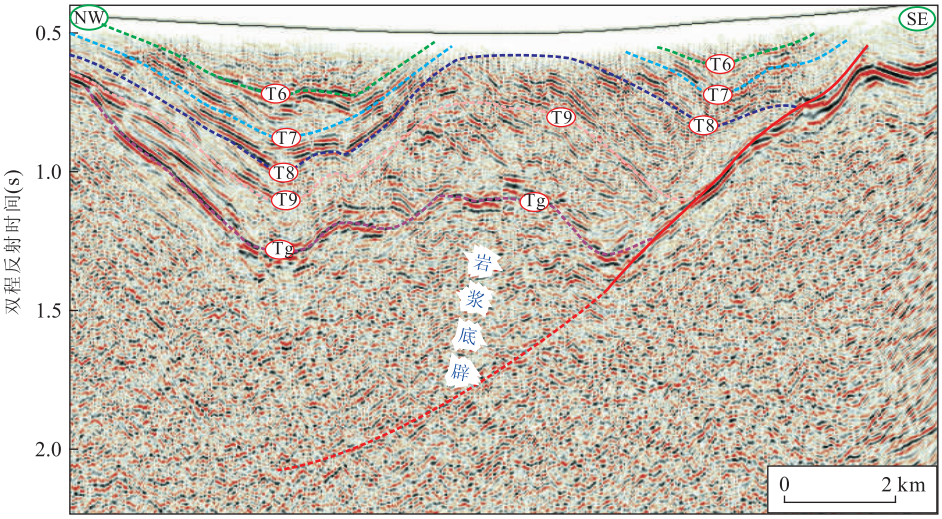

图 8　包楞构造带岩浆底辟构造反转特征

Fig. 8　The inversion structure caused by the magmatic diapiric in Baoleng structure zone

压褶皱(图 3,图 4),平面上与同时期发育的一些小断层呈小角度相交,且笔者从小断层与巴一号断层之间的夹角指向判断其应为左旋走滑(图 1),而且这与该时期区域应力场引起的走滑性质是一致的. 因此,凹陷内在马林洼陷和巴 51 井区形成的背形负花状构造样式应是巴一号断层发生左旋压扭活动导致的.

此外,该时期除了新发育的走滑反转构造外,在巴音都兰凹陷东部的包楞构造带还发育了岩浆底辟作用引起的反转构造(图 8). 从过包楞构造带的剖面来看,阿尔善组沉积期,巴东一号控盆断裂控制了该时期巨厚地层的沉积,直到腾一段沉积期该地区依然发生稳定沉降,而到腾二段沉积末期,该地区发生了构造反转,基底和早期沉积地层发生隆升并使上部地层发生严重剥蚀. 基于井镜质体反射率与深度的关系进行剥蚀厚度的恢复计算,任战利等(2000)发现包楞构造带上 b34 井的剥蚀厚度达 797 m,表明该地区的反转强度之大. 另外,该地区的反转构造平面上近椭圆展布,长短轴之比约 3∶2. 所以,不论从基底和早期沉降中心的隆升还是从平面展布形态以及反转强度之大,且未发生水平挤压产生的逆冲现象,足以表明该地区发生了较强的岩浆底辟构造,进而导致该地区构造反转.

3.5　反转构造的强度及分布

从前面对反转构造的识别及分析,笔者发现巴音都兰凹陷早白垩世期间发育了岩浆底辟作用引起的构造正反转和左旋压扭作用引起的构造正反转两种类型. 不同类型及同一类型不同时期发生的构造反转的强度及对盆地结构和油气藏的影响也不尽相同. 从对盆地结构的改造作用来看,阿三段末期及腾二段末期的构造反转主要集中在凹陷内部(图 1),并使基底发生隆升,因此反转强度最大,尤其是腾二段末期的构造反转对盆地结构及后期构造演化的影响最为显著,导致阿四段及以上沉积地层发生严重剥蚀. 而阿四段和腾一下段末期的岩浆底辟作用主要发生在控盆边界断裂的下盘(图 1),受岩浆底辟对控盆断裂下盘变质岩空间由下而上的侵占和挤压,导致盆地局部收到来自控盆断裂下盘由下而上的挤压应力,从而使控盆断裂上盘地层由下而上发生沿控盆断裂的逆冲现象,而且地层从盆地到控盆边界逆冲角度逐渐增大,并导致该地区发生高角度逆冲剥蚀. 反转强度取决于岩浆底辟的规模及对盆地挤压的强度,在该地区稍弱于盆地内部的岩浆底辟导致的反转. 另外,阿四段末期在凹陷内部的包楞构造带的西侧发育的岩浆底辟,并导致了巴一号断层下盘的隆升和阿三段的剥蚀现象,反转强度中等,到腾一段沉积期盆地整体沉降,沉积了较厚泥岩盖层,形成了巴 48 井区阿三段构造不整合油气藏. 相较而言,腾二段沉积期的走滑反转强度最弱,剥蚀量最小,对于油气圈闭的形成也最为有利.

4　反转构造成因机制探讨

反转构造的成因机制主要研究反转的形成机制和形成反转构造的动力学背景(褚庆忠,2004). 反转构造的形成机制与反转构造的类型密切相关,而反转构造的类型包括:伸展构造的反转、收缩构造的反

转、沉降构造的反转、隆起构造的反转、左旋走滑构造的反转以及右旋走滑构造的反转6类，并引出广义反转构造的概念，即将剖面上在原来向下的沉降位移(包括水平伸展、水平收缩、水平走滑和垂直位移引起的构造沉降)基础上叠加了向上的隆起位移形成的构造变形现象统称为“正反转构造”(漆家福等，2007). Dewey(1989)归纳的盆地反转的动力学机制之一便是盐底辟、热点等引起的抬升；杨风丽(2010)认为沉积盆地反转的动力学机制中包含了底辟作用和热点活动；杨克基(2016)将辽中凹陷由泥底辟作用形成的构造变形称之为正反转构造；刘见宝等(2010)认为底辟作用(包括泥底辟、盐底辟和火成岩底辟)形成的背形是由于塑性层的流动及受到横弯褶皱作用形成的，而并非是受到侧向挤压应力的影响. 作者认为底辟作用形成的构造变形是否属于构造反转不能一概而论. 假如底辟作用没有引起沉积地层的隆升活动，尤其是刺穿型底辟，其构造变形不能称为构造反转；但假如底辟作用导致了沉积地层的隆升活动，并遭受剥蚀，即发生了沉降构造的反转. 本文提到的4期岩浆底辟型构造正反转均属于沉降构造反转，其中阿四段和腾一下段沉积末期的构造反转，主要受到岩浆底辟侵入到控盆断裂的下盘并侵占原有物质空间后，对控盆断裂上盘的沉积层形成侧向挤压应力，从而导致沉积地层顺着控盆断裂逆冲，使沉积地层由早期的近水平展布发展成具有高角度倾角的倾斜地层，并遭受剥蚀，同时构造反转处的盆地范围变窄. 因此，在某种程度上说，该种岩浆底辟作用导致的构造反转也是受到了侧向挤压力的影响，并导致了局部地层的逆冲现象. 而阿三段和腾二段末期发生的岩浆底辟作用位于盆地内部，因而自下而上的岩浆底辟作用导致上部沉积地层发生抬升，并遭受剥蚀，这种垂直方向上的应力反向导致构造运动的极性发生反转，符合反转构造的定义，故属于反转构造的范畴.

另外，区域动力学背景决定了反转构造的成因机制，进而影响着反转构造的样式. 早白垩世早中期(135～120 Ma)，伊泽纳琦板块突然以北北西向高速俯冲于欧亚大陆之下，俯冲板片下沉引起地幔局部对流并打破原上地幔内部物理化学平衡，使大陆岩石圈发生拆沉、减薄，并产生次级的上升热幔软流(Maruyama *et al.*, 1997; Zhou and Li, 2000; 周新华，2006)，从而导致盆地该时期的高热流值(任战利等，2000)以及异常地幔上涌产生的岩浆底辟或火山喷发(任建业等，1998). 松辽盆地在该时期也发生了较为强烈的岩浆底辟型构造反转，使沉积地层发生高角度剥蚀(陈为佳等，2014). 但不同的是，二连盆地的拉伸活动是在厚地壳的基础上发育而来的，表现为宽裂陷作用和低伸展率的特点(任建业等，1998). 另外，二连盆地在该时期发育的沉降中心的展布所反映的区域NW-SE向的伸展应力场的方向与伊泽纳琦板块的俯冲后撤方向相吻合. 所以，该时期盆地的伸展活动很可能是异常地幔物质的上涌和伊泽纳琦板块俯冲后撤引起的弧后伸展作用共同影响的结果. 因此，盆地在早白垩世期间发生的4期底辟型正反转构造事件的成因机制应主要是在幕式伸展构造演化过程中深部异常地幔物质的上涌引起的岩浆底辟作用导致的.

到早白垩世晚期(120～110 Ma)，伊泽纳琦板块以20.5 cm/a的中高速俯冲于欧亚大陆之下，俯冲方向已由早期的NNW向转变成了正北方向俯冲于欧亚大陆之下(Engebretson, 1985; Maruyama *et al.*, 1997)，使得中国东部NNE或NE向深大断裂带发生左旋走滑活动，尤其是中国东部的郯庐断裂带(朱光等，2002). 另外，贯穿二连盆地的几条深大断裂同样在该时期发生了较大规模的左旋走滑运动(Yang *et al.*, 2014; 漆家福等，2015). 尽管巴音都兰凹陷处于二连盆地北部边缘，但在凹陷中部依然受到区域左旋走滑作用的影响，使得早白垩世早、中期沉积地层在走滑挤压分量作用下，由之前的负向地层单元转变成了以背斜构造为特征的正向构造单元，同时背斜部位发育背形负花状构造. 因此，腾二段沉积期部分反转构造的成因是由区域左旋压扭活动导致的构造正反转.

5 结论

通过对巴音都兰凹陷反转构造的识别，笔者厘定了巴音都兰凹陷在早白垩世裂陷期发育的正反转构造事件，发现在阿三段沉积末期、阿四段沉积末期、腾一下段沉积末期以及腾二段沉积末期均发育由岩浆底辟作用导致的构造正反转，其岩浆底辟的分布以中心式和中心－裂隙式的特点. 另外，从腾二段沉积期开始，巴一号断层受区域左旋走滑运动的影响，开始发生左旋压扭活动，使得马林洼陷和b51井区发生了走滑反转构造. 因此，巴音都兰凹陷在早白垩世经历了两种不同成因类型的正反转构造.

不同成因的反转构造的形成与其周围动力学背景密切相关. 其中，岩浆底辟型反转构造可能主要与

伊泽纳琦板块高速俯冲于欧亚大陆之下,引起地幔局部对流并打破原上地幔内部物理化学平衡,使大陆岩石圈发生拆沉、减薄,异常地幔物质上涌,从而形成火山喷发或岩浆底辟型构造反转;而走滑型反转构造则主要与伊泽纳琦板块的俯冲方向由早期的北北西向转变成了正北方向俯冲于欧亚大陆之下,使得中国东部北北东或北东向深大断裂带发生大规模区域左旋走滑活动导致的.

References

Bonini, M., Sani, F., Antonielli, B., 2012. Basin Inversion and Contractional Reactivation of Inherited Normal Faults: A Review Based on Previous and New Experimental Models. *Tectonophysics*, 522－523: 55－88. doi: 10.1016/j.tecto.2011.11.014

Buiter, S. J. H., Pfiffner, O. A., Beaumont, C., 2009. Inversion of Extensional Sedimentary Basins: A Numerical Evaluation of the Localisation of Shortening. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(3): 492－504. doi: 10.1016/j.epsl.2009.10.011

Chen, S. G., Ren, J. Y., Xin, Y. L., et al., 2015. Structure and Evolution Analyses of the Shabei Area of Bohai Gulf Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(5): 816－827 (in Chinese with English abstract).

Chen, W. J., He, D. F., Gui, B. L., et al., 2014. Tectono-Stratigraphic Sequence and Basin Evolution in Southern Songliao Basin. *Acta Geologica Sinica*, 88(5): 932－942 (in Chinese with English abstract).

Chen, Z. L., Liu, G. D., Lu, X. J., et al., 2015. Quantatitive Study on Inversion Degree of Inversion Tectonics and Its Impact on Hydrocarbon Accumulation in Erlian Basin, Northern China. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 46(11): 4136－4145 (in Chinese with English abstract).

Chu, Q. Z., 2004. Summary of Inversion Structure on Petroliferous Basin. *Journal of Xi'an Shiyou University*, 19(1): 28－33 (in Chinese with English abstract).

Cooper, M. A., Williams, G. D., De Graciansky, P. C., et al., 1989. Inversion Tectonics-A Discussion. *Geological Society, London, Special Publications*, 44(1): 335－347. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.044.01.18

Dewey, J. F., 1989. Kinematics and Dynamics of Basin Inversion. *Geological Society, London, Special Publications*, 44(1): 352. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.044.01.20

Engebretson, D. C., 1985. Relative Motions between Oceanic and Continental Plates in the Pacific Basins. *Geological Society of America Special Paper*, 206: 1－59. doi: 10.1130/SPE206－p1

Eisenstadt, G., Withjack, M. O., 1995. Estimating Inversion: Results from Clay Models. *Geological Society, London, Special Publications*, 88(1): 119－136. doi: 10.1144/GSL.SP.1995.088.01.08

Fei, B. S., Zhu, Y. H., Zhou, W. H., et al., 2001. The Oil and Gas Geology of Erlian Rifting Basins. Petroleum Industry Press, Beijing, 1－23 (in Chinese).

Harding, T. P., 1985. Seismic Characteristics and Identification of Negative Flower Structures, Positive Flower Structures and Positive Structural Inversion. *AAPG Bulletin*, 69(4): 582－600. doi: 10.1306/AD462538－16F7－11D7－8645000102C1865D

Hu, W. S., Li, R. S., Li, T., et al., 2007. Discussion on Dynamic Genesis of Positive Inversion Structure. *Journal of Oil and Gas Technology*, 29(4): 23－27, 164 (in Chinese with English abstract).

Korsch, R. J., Totterdell, J. M., Fomin, T., et al., 2009. Contractional Structures and Deformational Events in the Bowen, Gunnedah and Surat Basins, Eastern Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 56(3): 477－499. doi: 10.1080/08120090802698745

Li, X. N., Wang, T. H., 1997. Inversion Structures and Oil-Gas in Erlian Basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 11(2): 106－110 (in Chinese with English abstract).

Liu, J. B., Xia, B., Lü, B. F., et al., 2010. Comparative Analysis of Inversion Structure with Its Easily Confused Structures. *Geoscience*, 24(4): 744－748 (in Chinese with English abstract).

Liu, X. F., Dong, Y. X., Wang, H., 2010. Antiformal Negative Flower Structure in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 35(6): 1029－1034 (in Chinese with English abstract).

Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G., 1997. Paleogeographic Maps of the Japanese Islands: Plate Tectonic Systhesis from 750 Ma to the Present. *Island Arc*, 6(1): 121－142. doi: 10.1111/j.1440－1738.1997.tb00043.x

Qi, J. F., Xia, Y. P., Yang, Q., 2007. The Structural Analysis in the Oildom. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).

Qi, J. F., Zhao, X. Z., Li, X. P., et al., 2015. The Distribution of Early Cretaceous Faulted-Sags and Their Relationship with Basement Structure within Erlian Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 118－128 (in Chinese with English abstract).

Ren, J. Y., Lin, C. S., Li, S. T., et al., 1999. Sequence Strati-

graphic Framework of Wuliyasitai Faulted Basin in Erlian Basin Group and Its Episodic Filling Evolution. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(4): 553－559 (in Chinese with English abstract).

Ren, Z. L., Liu, C. Y., Feng, J. H., et al., 2000. Research on Geothermal History of Bayindulan Depression in Erlian Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 21(4): 42－45 (in Chinese with English abstract).

Scisciani, V., 2009. Styles of Positive Inversion Tectonics in the Central Apennines and in the Adriatic Foreland: Implications for the Evolution of the Apennine Chain (Italy). *Journal of Structural Geology*, 31(11): 1276－1294. doi: 10.1016/j.jsg.2009.02.004

Shinn, Y. J., 2015. Geological Structures and Controls on Half-Graben Inversion in the Western Gunsan Basin, Yellow Sea. *Marine & Petroleum Geology*, 68: 480－491. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2015.09.013

Su, J., Zhu, W., Lu, H., et al., 2009. Geometry Styles and Quantification of Inversion Structures in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, Eastern China. *Marine and Petroleum Geology*, 26(1): 25－38. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2007.08.003

Sun, Y. H., Chen, Y. B., Sun, J. G., et al., 2013. Evolutionary Sequence of Faults and the Formation of Inversion Structural Belts in the Northern Songliao Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 40(3): 275－283 (in Chinese with English abstract).

Turner, J. P., Williams, G. A., 2004. Sedimentary Basin Inversion and Intra-Plate Shortening. *Earth Science Reviews*, 65(3): 277－304.

Wang, G. C., 1998. Relationship of Tanlu Fault to the Inversion and Flower Structures in Bohai Bay. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, (5): 1－7 (in Chinese with English abstract).

Xiao, A. C., Yang, S. F., Chen, H. L., 2001. Geodynamic Background on Formation of Erlian Basin. *Oil & Gas Geology*, 22(2): 137－140 (in Chinese with English abstract).

Yang, F. L., Wang, M. X., Zhuang, J. J., et al., 2010. Kinematical Processes of Inversion Structure and its Contribution to Hydrocarbon Accumulation in Xihu Depression of East China Sea Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 31(4): 596－601 (in Chinese with English abstract).

Yang, K. J., Qi, J. F., Yu, Y. X., et al., 2016. The Inversion Structures within Liaozhong Depression and Its Responds to the Strike-Slip Activities of Tan-Lu Fault Zone. *Acta Petrologica Sinica*, 32(4): 1182－1196 (in Chinese with English abstract).

Yang, H. Z., Ren, J. Y., Lu, J. B., 2009. Tectonic Styles and Kinematic Characteristics of Negative Inversion Structure in Dongying Depression. *Earth Science*, 34(3): 493－501 (in Chinese with English abstract).

Yang, Y. T., Guo, Z. X., Song, C. C., et al., 2014. A Short-Lived but Significant Mongol-Okhotsk Collisional Orogeny in Latest Jurassic-Earliest Cretaceous. *Gondwana Research*, 28(3): 1096－1116. doi: 10.1016/j.gr.2014.09.010

Zhang, G. C., Xu, H., Liu, H. F., et al., 1996. Inversion Structures in Relation to Oil and Gas Field Distribution in Songliao Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 17(2): 9－14 (in Chinese with English abstract).

Zhu, G., Niu M. L., Liu, G. S., 2002. Structural, Magmatic and Sedimentary Events of the Tanlu Fault Belt during Its Early Cretaceous Strike-Slip Movement. *Acta Geologica Sinica*, 76(3): 325－334 (in Chinese with English abstract).

Zhao, X. Z., Jin, F. M., Wang, Q., et al., 2016. Re-Exploration Program for Petroleum-Rich Sags in Continental Fault Basin. Petroleum Industry Press, Beijing, 410－411 (in Chinese).

Zhou, X. H., 2006. Major Transformation of Subcontinental Lithosphere Beneath Eastern China in the Cenozoic-Mesozoic: Review and Prospect. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 50－64 (in Chinese with English abstract).

Zhou, X. M., Li, X. W., 2000. Origin of Late Mesozoic Igneous Rocks in South Eastern China: Implications for Lithosphere Subduction and Underplating of Mafic Magmas. *Tectonophysics*, 326(3－4): 269－287. doi: 10.1016/S0040－1951(00)00120－7

附中文参考文献

陈树光，任建业，辛云路，等，2015. 渤海湾沙北地区盆地结构构造及其演化分析. 大地构造与成矿学，39(5)：816－827.

陈为佳，何登发，桂宝玲，等，2014. 松南地区构造－地层层序与盆地演化. 地质学报，88(5)：932－942.

陈哲龙，柳广弟，卢学军，等，2015. 二连盆地反转构造程度定量研究及对油气成藏的影响. 中南大学学报(自然科学版)，46(11)：4136－4145.

褚庆忠，2004. 含油气盆地反转构造研究综述. 西安石油大学学报：自然科学版，19(1)：28－33.

费宝生，祝玉衡，邹伟宏，等，2001. 二连裂谷盆地群油气地质. 北京：石油工业出版社，1－23.

胡望水，李瑞升，李涛，等，2007. 正反转构造动力学成因探讨. 石油天然气学报，29(4)：23－27，164.

李心宁，王同和，1997. 二连盆地反转构造与油气. 中国海上油气地质，11(2)：106－110.
刘见宝，夏斌，吕宝凤，等，2010. 反转构造与其易混淆构造的对比分析. 现代地质，24(4)：744－748.
刘晓峰，董月霞，王华，2010. 渤海湾盆地南堡凹陷的背形负花状构造. 地球科学，35(6)：1029－1034.
漆家福，夏义平，杨桥，2007. 油区构造解析. 北京：石油工业出版社.
漆家福，赵贤正，李先平，等，2015. 二连盆地早白垩世断陷分布及其与基底构造的关系. 地学前缘，22(3)：118－128.
任建业，林畅松，李思田，等，1999. 二连盆地乌里亚斯太断陷层序地层格架及其幕式充填演化. 沉积学报，17(4)：553－559.
任战利，刘池阳，冯建辉，等，2000. 二连盆地巴音都兰凹陷热演化史研究. 石油学报，21(4)：42－45.
孙永河，陈艺博，孙继刚，等，2013. 松辽盆地北部断裂演化序列与反转构造带形成机制. 石油勘探与开发，40(3)：275－283.
王国纯，1998. 郯庐断裂与渤海海域反转构造及花状构造. 中国海上油气地质，(5)：1－7.
肖安成，杨树峰，陈汉林，2001. 二连盆地形成的地球动力学背景. 石油与天然气地质，22(2)：137－140.
杨风丽，王敏雪，庄建建，等，2010. 西湖凹陷反转构造定量运动学过程及对油气的控制作用. 石油学报，31(4)：596－601.
杨克基，漆家福，余一欣，等，2016. 辽中凹陷反转构造及其对郯庐断裂带走滑活动的响应. 岩石学报，32(4)：1182－1196.
阳怀忠，任建业，陆金波，2009. 东营凹陷负反转构造样式及其运动学特征. 地球科学，34(3)：493－501.
张功成，徐宏，刘和甫，等，1996. 松辽盆地反转构造与油气田分布. 石油学报，17(2)：9－14.
赵贤正，金凤鸣，王权，等，2016. 陆相断陷盆地富油凹陷二次勘探工程. 北京：石油工业出版社，410－411.
周新华，2006. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题. 地学前缘，13(2)：50－64.
朱光，牛漫兰，刘国生，2002. 郯庐断裂带早白垩世走滑运动中的构造、岩浆、沉积事件. 地质学报，76(3)：325－334.

* *

《地球科学》
2017 年 5 月　第 42 卷　第 5 期　要目预告

江汉平原典型含水层水文地质参数反演 …………………………… 陈　晨等
潜流带水文－生物地球化学：原理、方法及其生态意义 …………………… 杜　尧等
仙桃地区关键带生态演化与碳埋藏 …………………………… 郭　森等
贵阳市三桥地区岩溶地下水水化学特征及其演化规律 …………………… 李　华等
基于无人机遥感的河流阶地提取 …………………………… 李　辉等
基于氢氧稳定同位素识别干旱区棉花水分利用来源 …………………… 李　惠等
江汉平原高砷地下水中 DOM 三维荧光特征及其指示意义 ………………… 鲁宗杰等