

柴达木中生代盆地成因机制动力学

魏论研, 侯贵廷

北京大学地球与空间科学学院, 教育部造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京

收稿日期: 2022年1月4日; 录用日期: 2022年2月7日; 发布日期: 2022年2月14日

摘要

柴达木盆地是一个中、新生代的叠合盆地, 新生代盆地的成因机制研究比较成熟, 而中生代的成因机制尚存在一些争议, 本文通过二维有限元方法计算模拟柴达木盆地中生代的应力体系和成因机制。模拟结果表明: 盆地的构造演化与周缘大地构造背景密切相关, 结合野外构造观测和古地理演化, 认为柴达木盆地中生代断陷盆地演化经历两阶段: J_1 - J_2 时期为受近NWW方向拉应力作用的断陷盆地, J_3 - K_1 时期是受到近S-N向拉应力的断陷盆地, 柴达木盆地沉降中心从柴北缘转移到柴东地区, 最大主应力集中分布地区也从柴北缘转移到柴东。

关键词

柴达木盆地, 中生代, 应力场, 动力学, 数值模拟

Research on the Geodynamics of the Mesozoic Qaidam Basin

Lunyan Wei, Guiting Hou

Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (MOE), School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing

Received: Jan. 4th, 2022; accepted: Feb. 7th 2022; published: Feb. 14th, 2022

Abstract

The Qaidam Basin is a Mesozoic-Cenozoic superimposed basin. The research on the dynamic mechanism of the Cenozoic Qaidam basin is relatively mature, while there are still some disputes on the Mesozoic Qaidam basin. In this paper, the stress field and dynamics are obtained by establishing two stages of 2-dimensional finite element models. We can conclude that the tectonic evolution of the Mesozoic Qaidam Basin is closely related to the tectonic setting of the surrounding areas. Based on the field structural evidence and palaeogeographic evolution, it is considered that the

formation and evolution of Qaidam Basin in Mesozoic experienced two stages: During J_1 - J_2 period, there was a faulted basin subjected to tensile stress in near NWW direction, while during J_3 - K_1 period there was a faulted basin subjected to tensile stress in near N-S direction, the subsidence center of Qaidam Basin shifted from northern Qaidam Basin to eastern Qaidam Basin, and the concentrated distribution area of maximum principal stress also shifted from northern Qaidam Basin to eastern Qaidam Basin.

Keywords

Qaidam Basin, Mesozoic, Stress Field, Genetic Dynamics, Numerical Simulation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

柴达木盆地位于青藏高原北缘, 被昆仑山、祁连山造山带和阿尔金构造带所围限, 是青藏高原北缘重要的含油气盆地。侏罗纪时期是柴达木中生代盆地形成的关键时期, 由于周缘板块碰撞以及远距离板块远程效应的影响, 柴达木中生代盆地的性质比较难以定义。

对于柴达木中生代盆地性质主要有以下观点: 第一种观点认为柴达木盆地是从早侏罗世开始一直处于挤压构造背景的挤压盆地[1] [3]; 第二种观点认为柴达木北缘地区在早 - 中侏罗世受阿尔金断裂水平错动的影响是拉分盆地, 中 - 晚侏罗世为区域应力场为南北挤压的盆地[4]; 第三种观点认为早、中侏罗世为伸展断陷盆地, 晚侏罗世 - 白垩纪环境为南北向挤压构造环境下的挤压拗陷盆地[5] [6]; 第四种观点认为早侏罗世为伸展环境下的断陷盆地, 而中侏罗世 - 白垩纪为伸展型拗陷盆地[7] [8]。哪种观点能够更合理地解释柴达木中生代盆地的成因, 需要进一步开展柴达木中生代盆地形成的动力学机制研究。

针对柴达木构造演化和成因机制, 前人开展过一些研究。在侏罗纪时期, 羌塘块体和拉萨块体分别向北拼贴于欧亚板块南缘, 导致侏罗纪在柴达木西北地区处在两次强烈挤压碰撞之间的相对松弛伸展环境[9]。对于柴北缘做了专门的有限元建模并分析柴北缘东段的构造演化, 认为在侏罗纪柴北缘地区处于近 N-S 向的陆内拉张应力场[10]。采用罗盘和 GPS 分别在柴达木北缘冷湖、结绿素、鄂博良构造侏罗系的野外节理测量, 在下侏罗统实测数据经层面校正之后, 可获得东西、北东 - 南西、南北、北西 - 南东向 4 组挤压应力的方向, 在中上侏罗统实测数据层面校正之后可获得东西、北西 - 南东向的两组挤压应力, 且以东西方向为主[11]。目前的应力场研究表明, 侏罗纪时期存在弱伸展作用, 另外对于构造带一条 NNE 向地震测线构造演化剖面的分析表明, 侏罗纪存在一些正断层[12]。以上研究成果为柴达木中生代盆地形成的动力学机制研究提供了详细的地质学基础。

长期以来众多学者从沉积学、古地磁学、地震剖面等角度对柴达木盆地的成因与性质做了大量的研究, 但往往仅限于形态学和运动学分析, 缺乏动力学机制方面的研究。因此, 现以柴达木中生代两期地质演化模型为基础, 运用有限元数值模拟方法, 研究柴达木中生代盆地形成的动力学机制, 探讨其合理的成因模式。

2. 区域地质概况

柴达木盆地位于青藏高原东北缘, 是中国西部一个大型的中、新生代盆地。柴达木盆地四周均以深

断裂与相邻构造单元相隔,西部是阿尔金断裂,东部是祁连山-柴北缘逆冲褶皱带,南部是东昆仑断裂,这些边界断裂规模大,形成的时间早,活动的时间长,控制着盆地中新生的沉积。

柴达木盆地具有一个统一的前震旦系克拉通基底,柴达木地块中生代以前一直处于游离状态,中生代以来周围华北板块和塔里木地块对柴达木地块的构造演化具有重要的控制作用。根据古地磁资料来看,柴达木地块与塔里木地块、华北板块之间的空间关系变化对于中生代柴达木盆地的形成有很大的影响。古地磁研究表明,柴达木寒武纪时期位于南半球(4°S),古生代时期则以复杂的方式、非恒定的速度逐渐北移,到了二叠纪时已经位于北半球(12.7°N),三叠纪时期柴达木地块漂移到更北的位置(22.2°N),并且已与华北板块碰撞拼合,不再是一个游离块体[13][14][15][16][17]。三叠世末期,羌塘、拉萨等地块与欧亚大陆拼合、古特提斯洋闭合后,柴达木盆地的基底形成,进入陆相演化阶段,开始接受沉积,形成中生代的原型盆地,而现今的盆地基本形态则始于中生代的原型盆地[18]。

根据盆地基地地形、拗陷隆起的构成,柴达木盆地主要划分为昆北断阶带、中央拗陷、北部块断带三个构造单元,走向均为NW-SE,此外还有很多次级构造单元(图1)。昆北断阶带位于南部昆仑山山前,表现为冲断构造;中央拗陷在中部,沉积了巨厚的新生代沉积物,这些沉积物经历了由西北向东南的迁移过程;北部块断带位于北部祁连山山前地区,即柴北缘地区,以冲断构造为主。

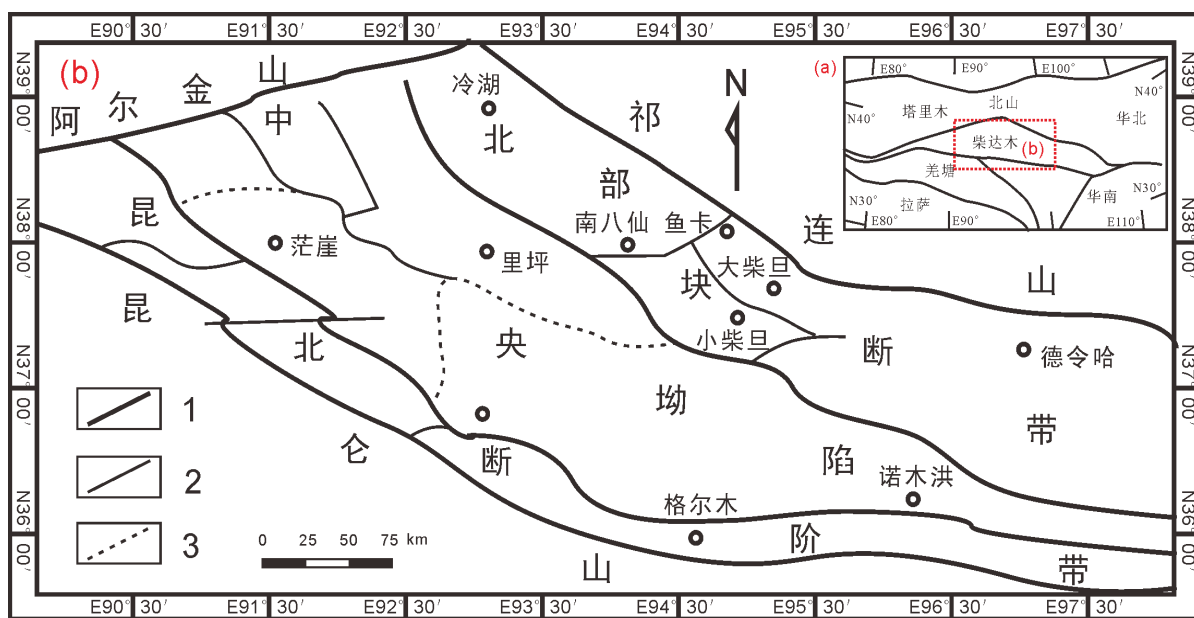


Figure 1. (a) Tectonic map around Qaidam (according to reference [2]), (b) Classification of tectonic unit in Chaidamu basin (according to reference [3])

图 1. (a) 柴达木周围大地构造位置图(据文献[2]), (b) 柴达木盆地构造单元划分(据文献[3])

柴达木盆地新生代的沉积记录较为完整、地层分布也十分广泛,但是中生代的沉积记录比较零散。柴达木中生代盆地的沉积主要由侏罗系和白垩系构成,根据野外观察到的沉积资料,侏罗系的残余沉积范围主要分布于柴北缘山前和凹陷带以及阿尔金山南缘断裂带附近,此时柴达木盆地的沉积范围比较小,在盆地内形成相对独立的小盆地群, J_1 - J_2 时期受到同生张性断裂,盆地性质为南北向伸展构造环境下的断陷型盆地[19];后来柴达木地区则受南祁连山前冲断构造体系控制,其沉积范围明显变大, J_3 - K_1 时期柴达木盆地的原始沉积范围明显扩大,但是残余沉积范围更加局限,仅较广泛的分布在柴东地区以及零星分布于柴北南八仙-鱼卡地区以及大柴旦-红山地区。

总而言之, 先期柴达木盆地沉积中心主要分布在祁连山南侧和阿尔金山前带附近, 后期则主要分布在欧南-德令哈和埃南附近, 柴达木盆地沉积中心呈现出从西北向东南逐渐迁移的规律。

3. 有限元方法与应力场理论概述

有限元方法是把要研究的结构物划分成有限个简单形状的单元, 先是对单元逐个进行分析, 然后再将这些单元合成整体进行分析, 在经过这种先分后合的处理后, 可使整个问题化简[20]。在应力场分析中, 有限元方法是目前各种研究方法中比较成熟也比较有效的一种方法, 使用这种方法可以解决古构造应力场的数值模拟、地震应力场及地震迁移、造山带与盆地的模拟等不同领域的地质问题[21] [22] [23] [24]。

构造应力场是在一个空间范围内构造应力的分布, 对于推断地质构造变形演化过程的研究十分重要, 使用数值模拟方法计算应力场有助于我们进行地质构造演化的动力学机制研究。应力场的重建要使用到线弹性理论和二维有限元模型[25], 在收集足够资料的基础上, 建立相应的地质模型、力学模型及有限元模型, 分析出初始条件、边界条件后即可进行计算、拟合和解释, 研究构造变形的演化过程[22], 这个思路对于研究盆地成因机制依然很适用。

盆地沉积中心和主要控制盆地内正断层的走向通常被认为平行于区域水平最大主压应力(σ_{Hmax})方向, 垂直于伸展方向[26] [27]。最大差应力指的是最大主张应力与最大主压应力之差 $\sigma_1 - \sigma_3$, 能够较好反映一个地区的应力集中情况, 在岩石力学性质、力学参数接近的情况下, 最大差应力越大则该区域越容易发生破裂。与通过建立变形后的应变(即通过最大差应力)与沉积中心之间的关系, 可以将应变能密度用于作为判断盆地模式和推导应力场演化的指示之一[24] [28]。

当材料受到平面剪应力 τ_{xy} 时, 给定点的应变能密度可以表示为:

$$u = \int_0^{\gamma_{xy}} \tau_{xy} d\gamma_{xy} \quad (1)$$

u 为应变能密度(J/m^3), γ_{xy} 为对应于 τ_{xy} 的剪切应变。

当一个物体处于一般的三向应力状态, 应变能密度可通过这六个应力分量 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 表示, 所涉及的六个应力应变关系均为线性关系, 应变能密度表达式为:

$$u = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx}) \quad (2)$$

将(2)式与虎克定律联系, 消除应变分量, 表达式全部用应力分量表示。如果将给定点的主轴用作坐标轴, 则剪应力变为零, 公式变为:

$$u = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (3)$$

其中 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 是给定点的主应力。

应变能密度可分为两部分, 一部分 u_v 与该定点材料体积变化相关, 另一部分 u_d 与该定点材料外形变形相关[28] [29]。两部分应变能分别表示为:

$$u_v = \frac{1-\nu}{6E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) \quad (4)$$

$$u_d = \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (5)$$

盆地形态的发育与特征应变能密度有关。一般来说, 偏应变能密度越大, 沉积越厚, 最大差应力是偏应变能密度的等效值[24] [26]。因此, 我们可以根据最大差应力分析盆地模式的演化和分布。

4. 柴达木中生代盆地成因机制数值模拟

基于柴达木中生代盆地构造背景建立地质模型, 来研究中生代柴达木盆地应力场演化的区域水平最大主压应力方向(σ_{Hmax})和盆地模式分析的应力场分布(最大差应力, $\sigma_1-\sigma_3$)。通过 COMSOL Multiphysics 5.5 软件对柴达木中生代两期盆地(J_1-J_2 : 208~152 Ma; J_3-K_1 : 152~105 Ma)做动力学模拟, 通过改变边界条件与边界条件的压力值来做最符合当时应力场条件的模型, 进而研究柴达木中生代盆地形成发育的动力学机制。

4.1. 地质建模和边界条件

柴达木盆地是一个类似三角形形状的盆地, 其周围发育有很多断裂。将地质模型进行简化, 得到具有一定厚度的平面薄板几何模型, 不考虑垂向变化对模型的影响(图 2)。几何建模之后依据岩石力学参数进行力学建模。为了将几何模型转换为可用于有限元数值模拟的力学模型, 还需确定不同地质单元的杨氏弹性模量、泊松比和岩石密度等岩石力学参数。根据柴达木盆地侏罗系地层的主要岩性, 设置盆地的岩石力学参数: 密度为 2700 kg/m^3 , 杨氏模量为 30 GPa, 泊松比为 0.18 [10]。

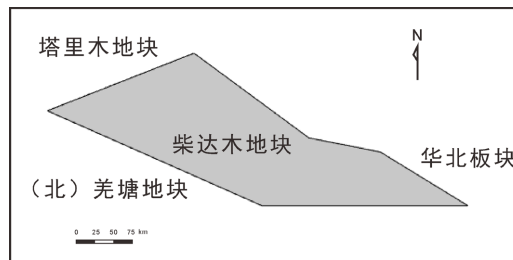


Figure 2. Geological modeling map of Qaidam basin
图 2. 柴达木盆地地质建模图

因为我们研究的目的是建立有限元模型模拟柴达木盆地中生代成因, 所以我们要研究不同时期的盆地模型, 确定它们的边界条件, 从而揭示盆地的构造演化。根据前人以古地磁数据和视极移曲线汇编出来的古地理图[17], 我们可以得出以下结论(图 3): 柴达木地块在三叠纪早期(260 Ma)柴达木地块东边界已与华北板块碰撞拼合, 西边界与塔里木地块东南边界以阿尔金右旋走滑的形式相接, 南边界为大洋是自由边界; 三叠纪晚期(220 Ma)柴达木地块南边界依次受到北羌塘、南羌塘地块的向北的挤压应力, 西边界为右旋走滑边界, 此时柴达木盆地受到应力发生逆时针旋转。侏罗纪是中生代柴达木盆地形成的关键时期, 侏罗纪早-中期(160 Ma 以前)柴达木盆地北边界东段受到来自华北板块向南的挤压, 西边界为右旋走滑边界, 北边界东段受到向南的挤压应力, 南边界有可能受到向北的挤压应力, 其他部位是自由边界; 侏罗纪晚期(160 Ma 之后)由于南边界受到挤压的应力, 西边界走滑方向发生变化, 为左旋走滑边界, 同时北边界东段变为固定边界, 南边界有受到向北的挤压应力, 其他部位是自由边界(表 1)。

Table 1. Paleogeographic reconstruction of Qaidam block and its surrounding blocks (according to reference [17])

表 1. 柴达木地块与周围地块的古地理重建(据文献[17])

时期	模型	阿尔金断裂 (西边界)	昆仑断裂 (北边界东段)	祁连断裂 (南边界西段)	其他边界
J_1-J_2	模型 I	右旋走滑	SW 方向的压应力	自由边界/N 方向的压应力	自由边界
J_3-K_1	模型 II	左旋走滑	固定边界	NNE 方向的压应力	自由边界

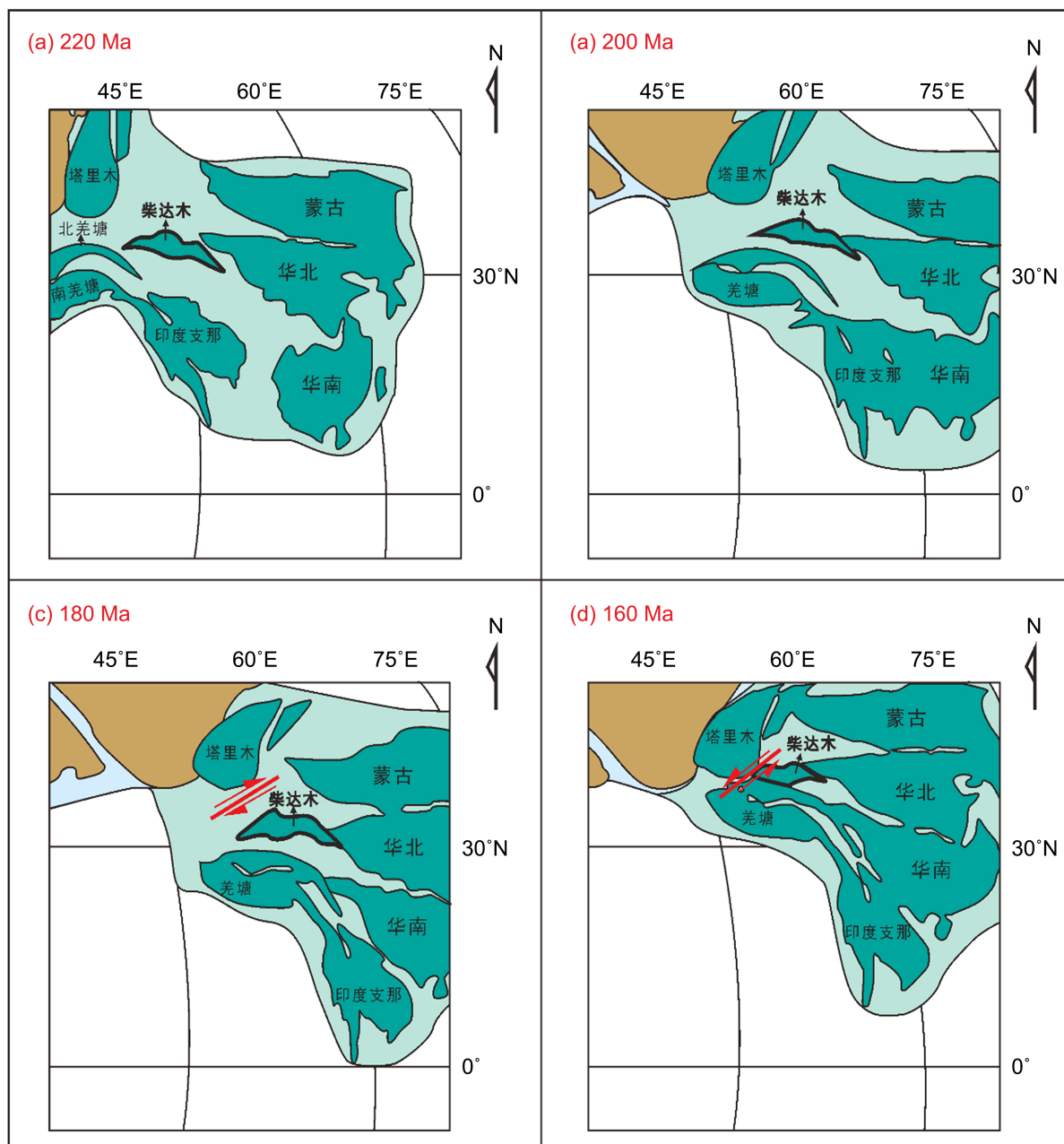


Figure 3. Paleogeographic reconstruction of Qaidam block and its surrounding blocks (according to reference [17])

图 3. 柴达木地块与周围地块的古地理重建(据文献[17])

4.2. 中生代应力场演化

柴达木盆地可以看作是阿尔金山、东昆仑山、祁连山三大构造体系叠合的产物, 其基本动力学背景是受到南部印度板块的向北挤压, 同时受到北部阿拉善地块的阻挡以及东侧华北板块、西侧塔里木地块的侧滑而形成力偶环境[12] [30]。

在早 - 中侏罗世, 受到扬子板块北向移动的影响, 华北板块逆时针旋转, 柴达木地块与华北板块完全碰撞拼合成为整体, 柴东地区会因受力发生弯曲和小范围的顺时针旋转, 而柴达木西边界则沿发生右旋走滑(图 3)。柴东地区受 SN 向弱拉张形成了一些差异断陷沉降带(如德令哈凹陷等), 走滑作用对其影

响较小[12]。阿尔金断裂附近形成的拉分断陷、平行排列强制单斜、雁列式正断层等地质证据也可以证实柴达木西边界右旋走滑的成立[31]。

在西边界确定为右旋走滑、北边界东段确定为 SW 方向的压应力、其他边界为自由边界的条件下, 我们分别计算南边界西段为自由边界、受到 N 方向的压应力的面主应力分布、最大差应力分布图和位移场, 得到了三组模型(图 4)。在确定北边界东段压应力大小的参数为 30 MPa 之后, 我们改变南边界西段压力的大小, 发现随南边界西段压力值的增大, 最大差应力的最大值中心开始由北边界东段最北端向北边界中段转移, 最大值的数值也在变小, 说明了南边界是否受到应力、受到压力的大小会对最大差应力所在位置、地块旋转方向产生影响(图 4)。

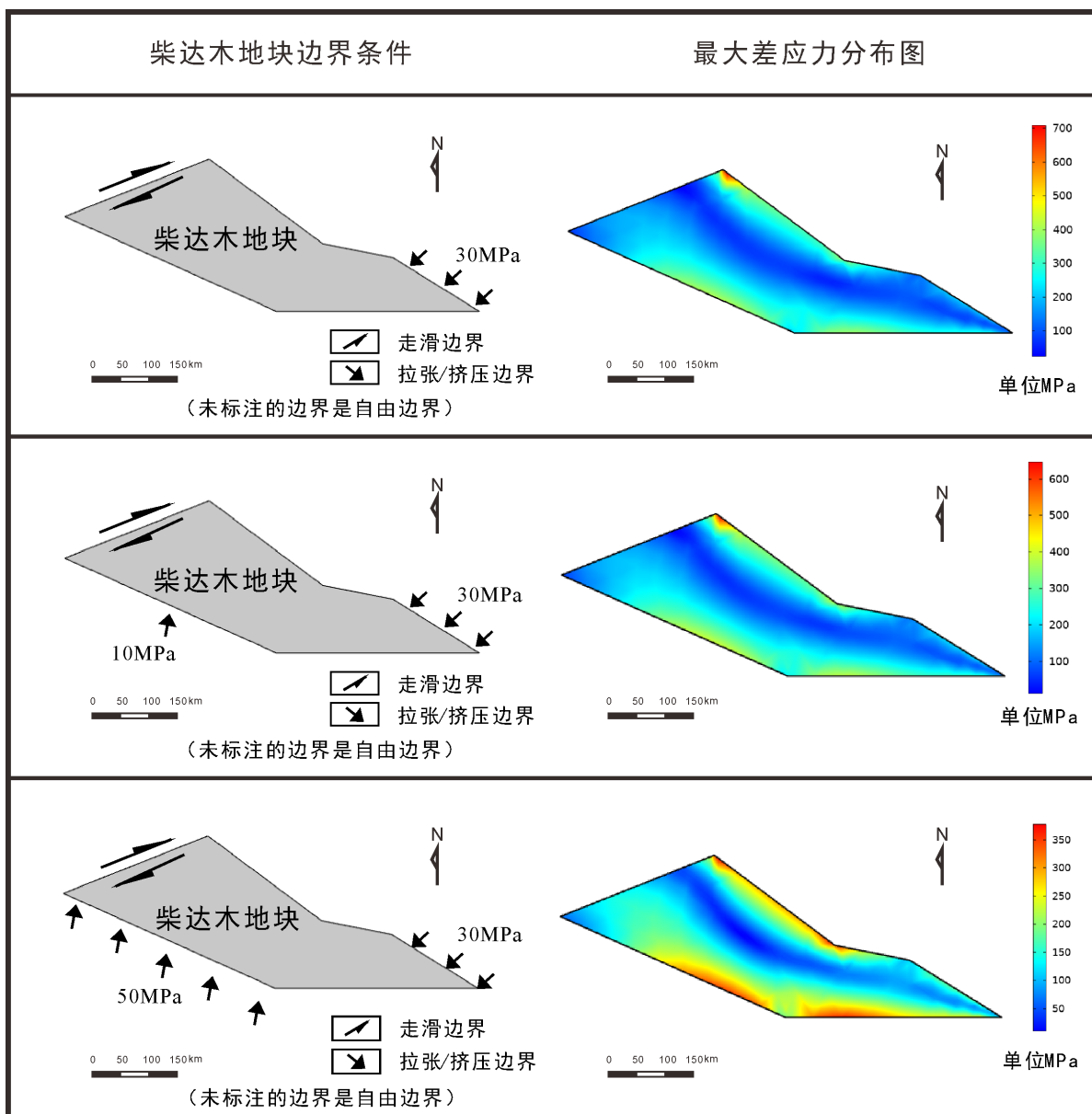


Figure 4. Boundary conditions and maximum differential stress distribution of three models with different pressures in the western part of the southern boundary of Qaidam basin in early-middle Jurassic

图 4. 早 - 中侏罗世柴达木盆地南边界西段压力不同的 3 种模型边界条件和最大差应力分布图

对于晚侏罗世 - 白垩纪, 柴达木地块南部受到羌塘地块的挤压, 柴达木地块有顺时针旋转趋势, 同时柴达木地块又向北移动与塔里木地块靠近, 导致北边界西段阿尔金断裂发生左旋走滑(图 3)。柴东地区在白垩纪是挤压反转阶段, 应力场转变为 NE-SW 向挤压, 柴达木盆地东部受挤压应力作用单纯地向祁连山产生推覆[12]。

晚侏罗世 - 早白垩纪, 由于柴达木北缘东部已与华北板块碰撞拼合, 所以确定其为固定边界。首先我们假定南边界西段为自由边界, 通过调试北边界西段走滑距离大小的参数, 使得最大差应力大小比较合适。考虑到南边界压力会对应应力场形成一定影响, 不断调整走滑距离后, 采用合适的走滑边界条件(图 5)。

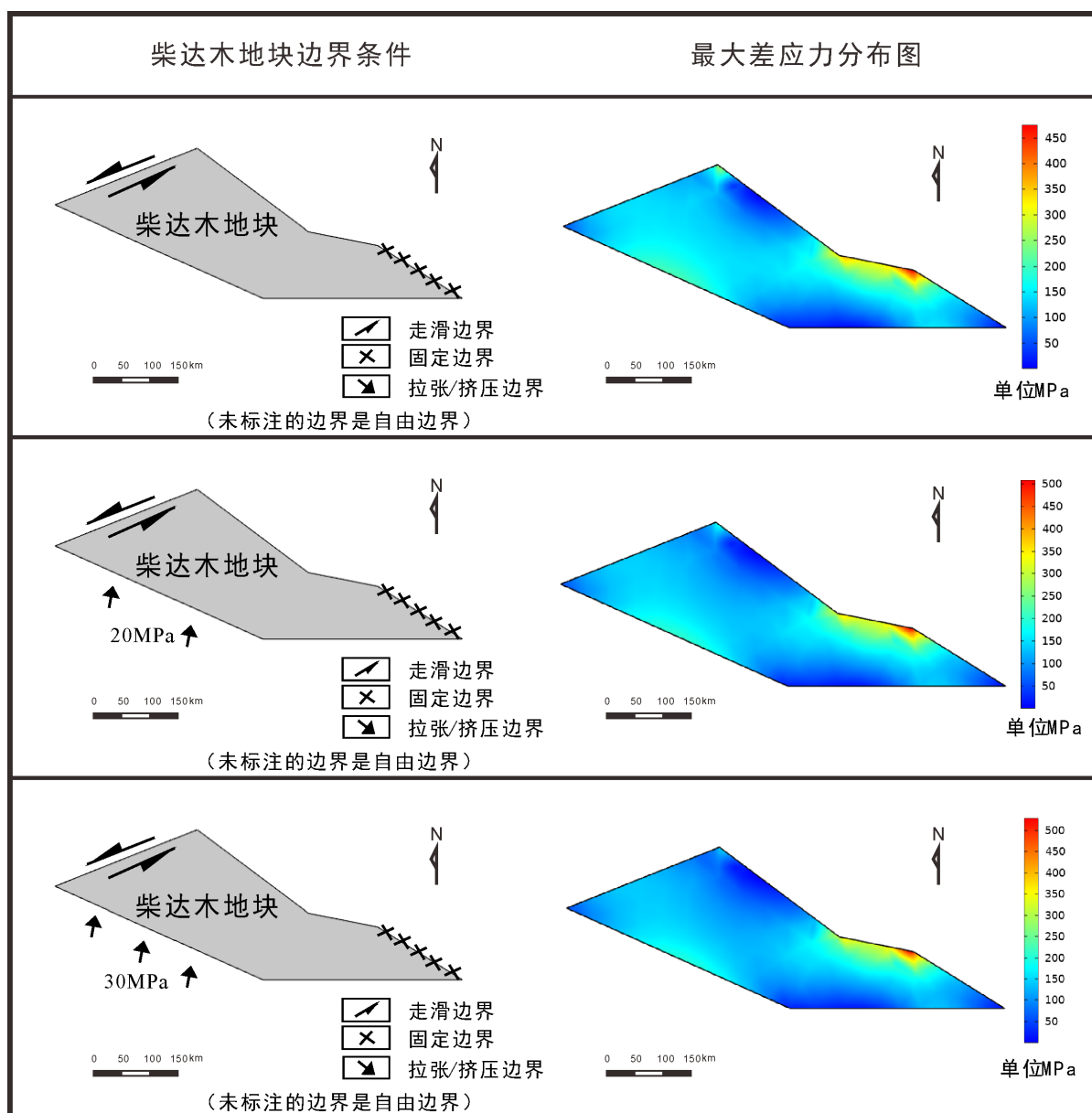


Figure 5. Boundary conditions and maximum differential stress distribution of three models with different pressures in the western part of the southern boundary of Qaidam Basin from Late Jurassic to Early Cretaceous

图 5. 晚侏罗世 - 早白垩纪柴达木盆地南边界西段压力不同的 3 种模型边界条件和最大差应力分布图

自早侏罗世以来, 柴达木南部持续受到北羌塘、南羌塘等地块向北部的挤压, 至晚侏罗世时压应力大小也不断增加, 所以在确定北边界西段走滑距离大小的参数之后, 改变南边界西段压力的大小, 分别取压力值为 20 MPa、30 MPa (图 5), 相较于南边界西段不受压力的模型, 南边界西段压力为 20 MPa 时的模型应力最大差应力值在整个盆地西部主体部分范围变小, 而且在北边界中、东段的最大差应力值也增大一些。随压力值增大, 最大差应力分布图向着最大差应力值在整个盆地西部主体部分范围变小、北边界中、东段的最大差应力值也增大的方向转变(图 5)。

早侏罗世 - 中侏罗世高差应力值集中于盆地北部和南部, 尤其北部的差应力值最大, 盆地北部受到伸展作用最强, 北边界受到的主要是张应力, 与前人研究的柴达木盆地类型为断陷盆地, 构造变形为同生张性断裂相呼应[5] [6]; 晚侏罗世 - 早白垩系高差应力值集中于北边界中东部, 而在柴东地区主要受到的是近南北方向的张应力, 这有利于形成近东西方向的断陷盆地。

4.3. 应力场和沉积中心的关系

一般来说, 较高的应力集中会导致较大的伸展地质背景, 这有利于伸展盆地中更厚的沉积[12]。通过对中生代两期最大差应力等值线与沉积中心等值线图的对比, 我们分析柴达木盆地应力场与沉积中心的关系。

根据计算出来的早 - 中侏罗世应力场模型, 我们可以得到最大差应力分布图(图 6), 图中最大主张应力分布在柴北缘地区西段和中段, 在这个区域主要是受到张应力, 张应力的方向大体沿着盆地边界的方向, 在柴北缘西段最大主张应力的方向是 NW-SE 方向, 在中段最大主张应力的方向近 NWW-SEE 方向。在沉积分布图上(图 8), 早侏罗世主要表现为几个相互独立的断陷湖盆, 平面上主要有三个带, 呈断续分布, 中侏罗世沉积范围明显扩大, 使早侏罗世分割的小断陷盆地相继连成几个较大的断陷盆地[5], 整体看来, 早 - 中侏罗世的沉积主要集中在北部地区, 沉积中心呈南北向和 NW-SE 向分布。

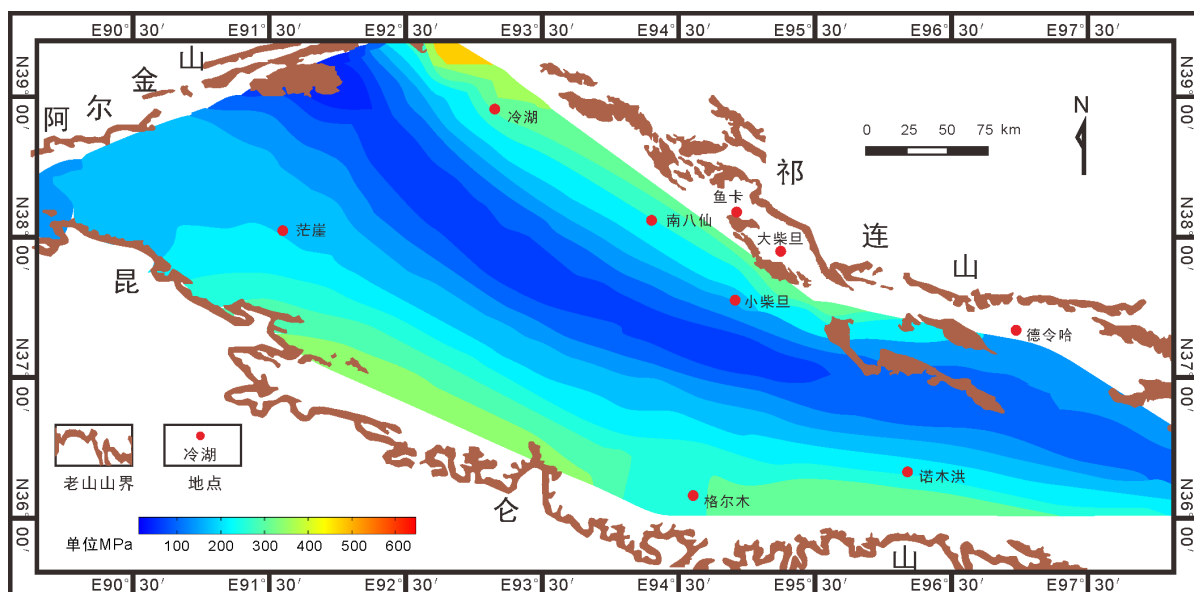


Figure 6. Distribution of maximum differential stress in Qaidam Basin of Early-Middle Jurassic

图 6. 早 - 中侏罗世柴达木盆地的最大差应力分布图

柴达木地块北边界东段受到华北板块向南的挤压, 而西边界受到阿尔金右旋走滑的影响, 所以在柴北缘会受到近 NWW-SEE 方向的张应力, 进而会形成这种断续式的沉积分布。对比最大差应力分布图与沉积图, 差应力高值区与盆地沉降中心一致, 最大主张应力分布区与断陷湖盆分布区在空间上比较吻合(图 7, 图 8)。

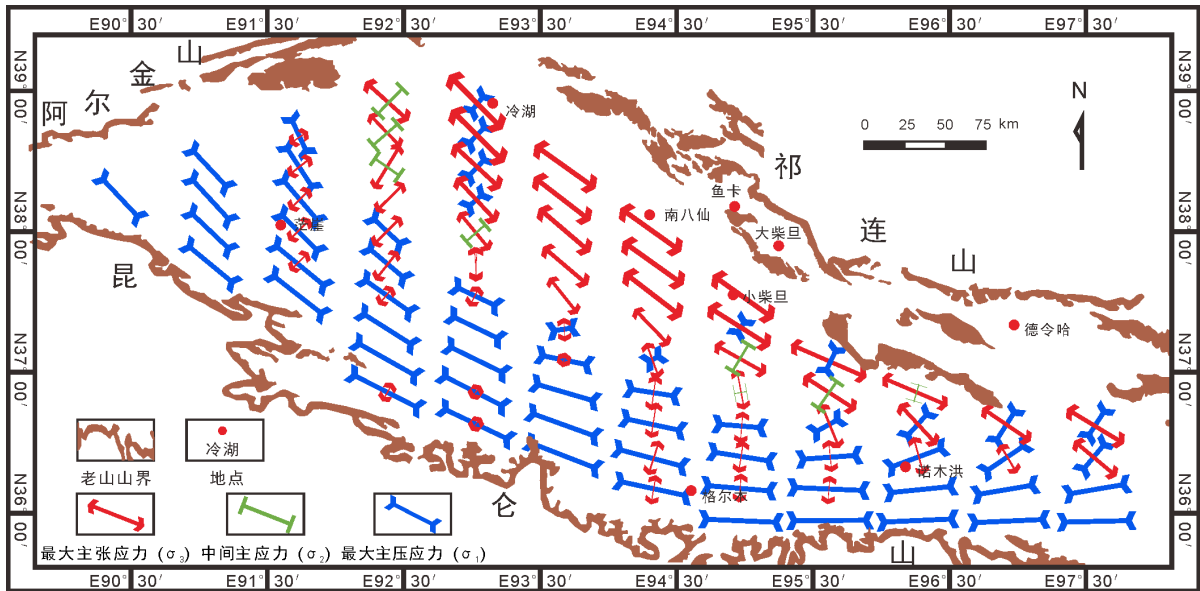


Figure 7. Distribution of maximum differential stress in Qaidam Basin of Early-Middle Jurassic
图 7. 早 - 中侏罗世柴达木盆地的主应力轨迹线

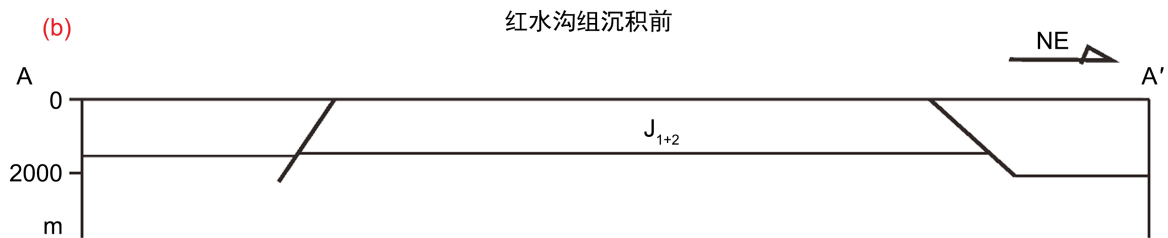
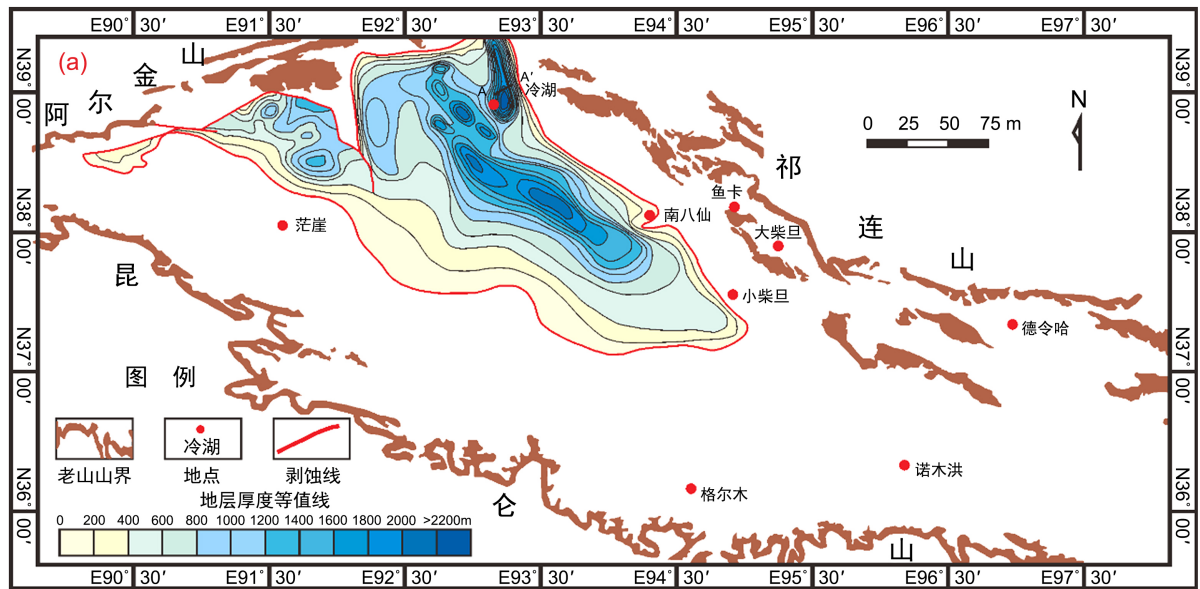


Figure 8. (a) Distribution map of lower Jurassic residual strata in Qaidam basin (according to reference [6]), (b) structural profile map of 244 line in northern margin of Qaidam basin in early-middle Jurassic (according to reference [5])
图 8. (a) 柴达木盆地地下侏罗统残余地层分布图(据文献[6]), (b) 柴达木盆地北缘 244 测线侏罗纪早 - 中期构造剖面图(据文献[5])

根据计算出来的晚侏罗世 - 早白垩世应力场模型, 同样可以得到最大差应力分布图(图 9), 这个时期的差应力分布与早 - 中侏罗世应力场分布完全不一样, 图中在柴北缘地区中段主要是受到压应力, 压应力的方向近 NWW-SEE 方向, 而张应力比较集中的位置在德令哈拗陷附近, 这里的构造环境是南北向弱拉张。在沉积分布图上(图 11), 晚侏罗世(至白垩纪)盆地的沉积特征与早、中侏罗世也明显不同, 盆地沉积中心是从早 - 中侏罗世的柴北缘转移到柴东地区德令哈 - 乌兰一带, 在东北部的沉积中心呈 NW-SE 向分布。

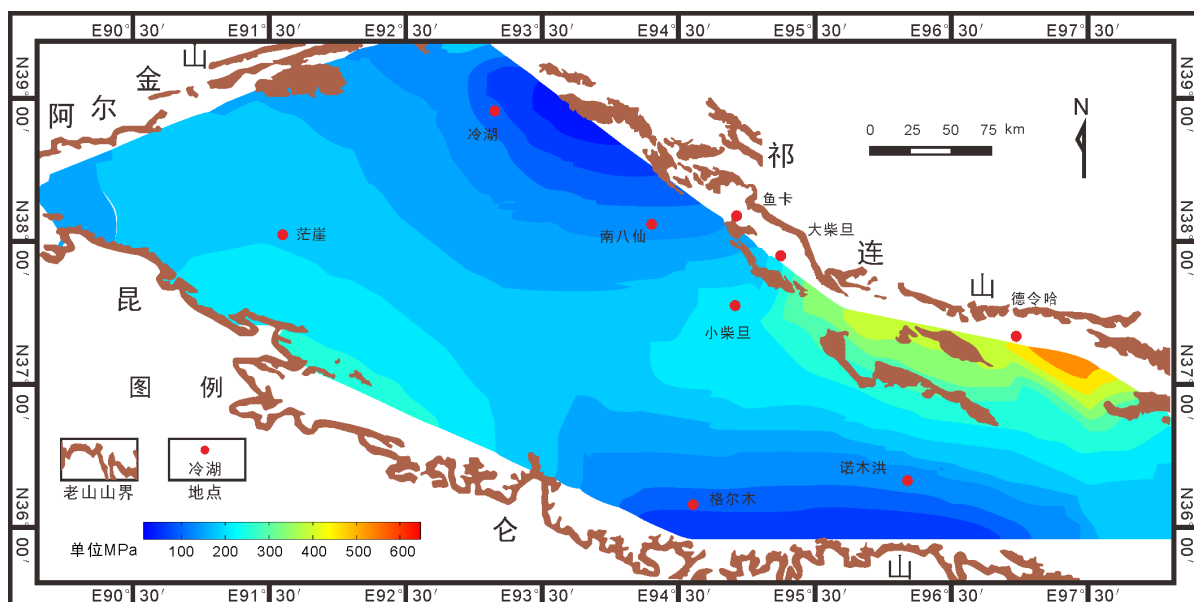


Figure 9. Distribution Map of Maximum Differential Stress in Qaidam Basin from Late Jurassic to Early Cretaceous
图 9. 晚侏罗世 - 早白垩纪柴达木盆地最大差应力分布图

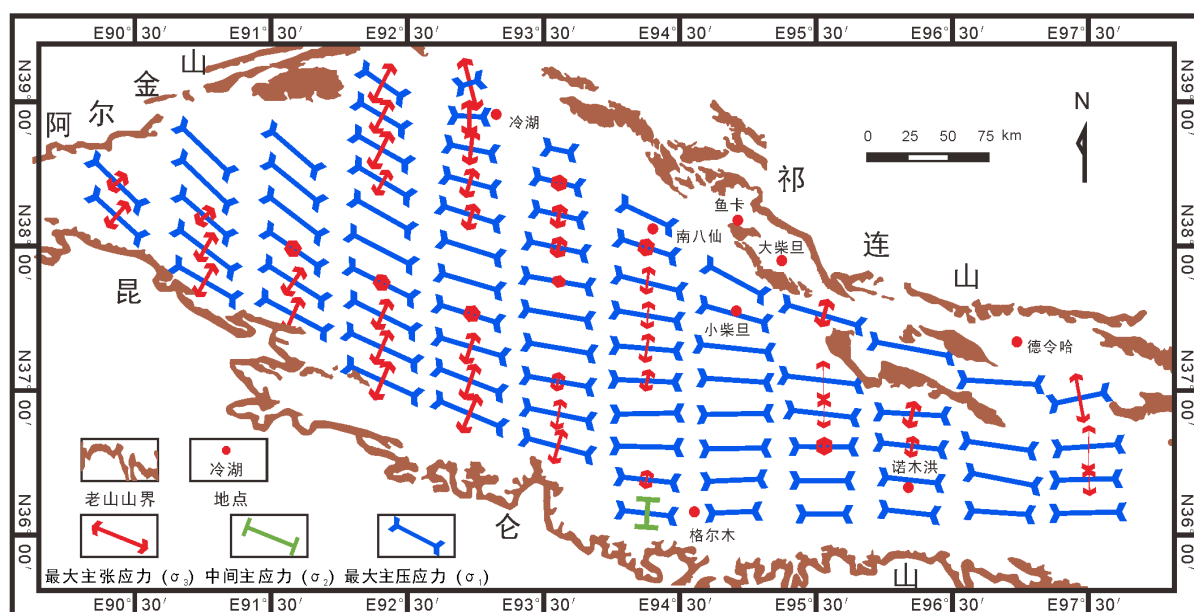


Figure 10. Main stress trajectory of Qaidam Basin from Late Jurassic to Early Cretaceous
图 10. 晚侏罗世 - 早白垩纪柴达木盆地的主应力轨迹线

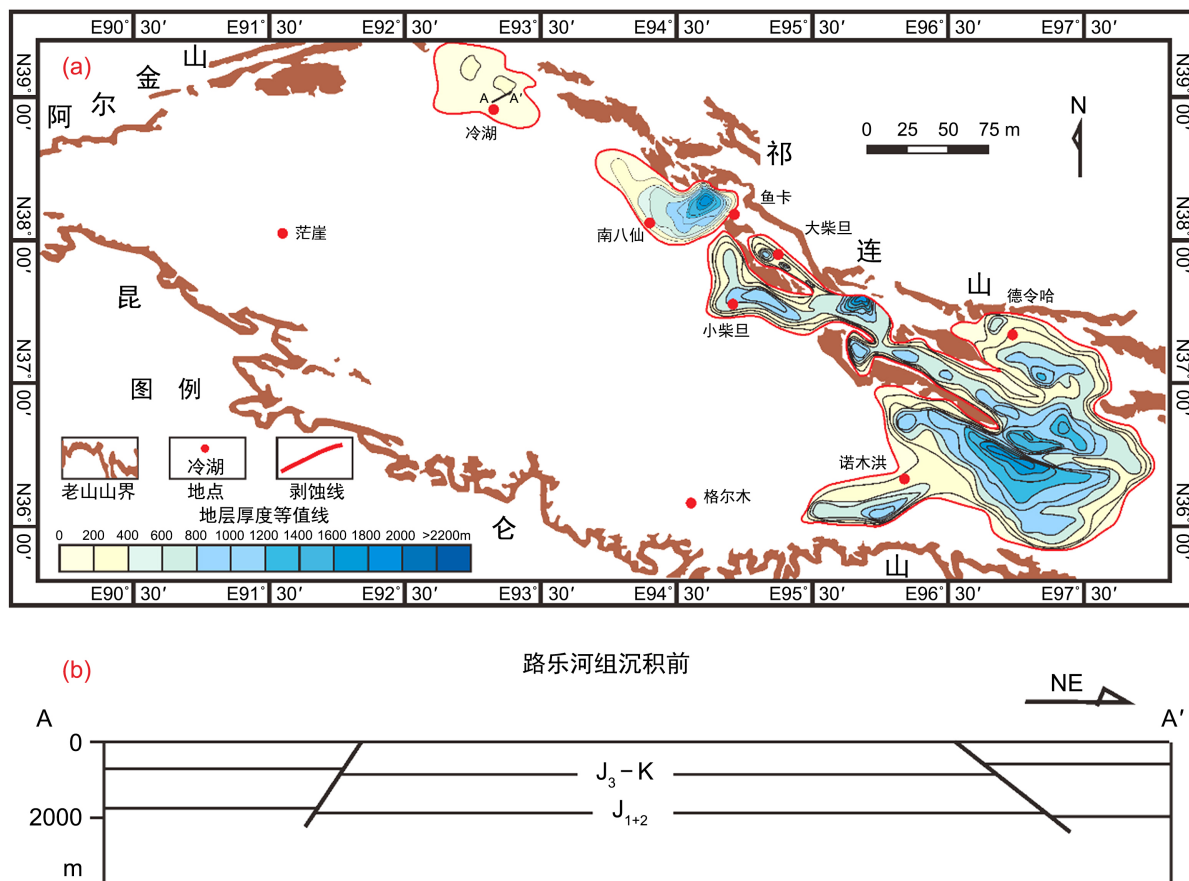


Figure 11. (a) Distribution map of upper Jurassic residual strata in Qaidam basin (according to reference [6]), (b) structural profile map of 244 line in northern margin of Qaidam basin (according to reference [5])

图 11. (a) 柴达木盆地上侏罗统残余地层分布图(据文献[6]), (b) 柴达木盆地北缘 244 测线侏罗纪晚期 - 白垩纪构造剖面图(据文献[5])

发生这种变化的主要原因是柴达木西边界阿尔金走滑性质的改变, 阿尔金由右旋走滑转换为左旋走滑, 进而应力场由近 NWW-SEE 方向的拉张为主变为以近 NWW-SEE 方向的挤压为主, 仅在柴东地区由近南北向的张应力分布, 沉积也就由柴北缘地区转移到了柴东地区, 沉积方式也从 J₁-J₂ 时期在柴北缘地区断续分布转变为到 J₃-K₁ 时期主要于柴东地区集中分布。对比最大差应力分布图与沉积图, 差应力高值区与盆地沉降中心一致, 最大主张应力分布区与柴东主要沉积区在空间上有较好的吻合。

J₁-J₂ 时期的残余地层图(图 8)表明, 此时期柴达木盆地残余沉积范围主要分布于柴北缘山前和凹陷带以及阿尔金南缘断裂带附近, 地层厚度等值线均呈 NWW 向, 地层沉积也分布在昆特依凹陷、南八仙、北陵丘等区域, 厚度由北向南逐渐变薄, 总体上呈现出“东西展布, 南北分带”的特点, 全区地层最大厚度集中于冷湖构造带, 在冷湖附近最大厚度大于 2200 m [5] [6]。在我们计算出来的最大差应力分布图中, 边界效应主要集中在北边界的端点以及两个拐点处, 在红色所分布的区域内受到影响, 在远离这个区域的地方, 边界效应可以忽略。分析计算出来的 J₁-J₂ 时期最大差应力分布图, 最大差应力高值区主要分布在柴北缘地区, 最大差应力等值区域呈条状分布, 方向大体沿着盆地边界的方向即 NWW 向, 最大差应力值主要分布范围为 20~40 MPa, 最大值在最北缘。对比最大差应力分布图与沉积图, 可以发现最大主张应力分布区与断陷湖盆分布区在空间上有较好的吻合。

J₃-K₁ 时期的残余地层图(图 11)表明, 此时期柴达木盆地残余沉积范围主要分布在柴北缘冲断带前缘

地带的南八仙 - 鱼卡地区以及大柴旦 - 红山断陷、柴东的欧南 - 德令哈断陷和埃南断陷等地区, 这几个断陷的沉积中心附近地层厚度总体呈现从中间向两边减薄的特点, 位于最北的大柴旦 - 红山断陷附近的残余厚度最大 200 余 m, 到盆地东部的柴东地区, 地层分布范围逐渐增大, 沉降中心向南迁移, 在德令哈断陷地层厚度可达 800~1200 余 m, 在其南的埃南断陷厚度最大, 达到 1800 余 m [5] [6]。分析计算出来的 J_3-K_1 时期的最大差应力分布图, 这个时期的最大差应力分布与早 - 中侏罗世的最大差应力分布完全不一样, 图中有三处最大差应力高值区, 一处位于北缘最北端, 另外两处集中位于东部区域。以讨论位于东部区域的高值区为例, 东部区域的最大差应力等值区域近似沿两个高值区呈半圆盘状分布, 从中心到盘缘最值减小, 最大差应力值主要分布范围为 20~40 MPa, 最大值在半圆盘的中心。对比最大差应力分布图与沉积图, 可以发现最大主张应力分布区与主要沉积分布区在空间上有较好的吻合。

对比 J_1-J_2 和 J_3-K_1 这两个时期的残余地层图和最大差应力分布图, 吻合度较高(图 7, 图 8, 图 10, 图 11)。综上所述, 应力场对柴达木盆地沉积中心的分布有一定影响, 我们通过计算得出这两幅图, 验证了侏罗纪柴达木盆地的两期边界条件是合理的, 与观测到的地质证据有很好的一致性, 这两个模型可以用来探讨柴达木盆地的成因机制。

4.4. 柴达木中生代盆地的成因讨论

利用数值模拟对柴达木盆地中生代两期的应力场和成因进行了建模和分析, 表明边界条件对盆地内格局起着重要的制约作用, 柴达木盆地的形成机制与华北板块、塔里木地块、羌塘地块的构造背景与演化有重要关系, 阿尔金走滑性质的变化对于柴达木盆地内部应力场的演化和两期不同性质盆地的形成有较大影响, 南边界受到压应力的影响也会影响盆地的运动性质和旋转方向, 进而影响盆地内部的应力场和差应力分布。

晚三叠世末, 可可西里、巴颜喀拉等地块与欧亚大陆拼合, 北特提斯洋闭合。在强烈的挤压作用下, 东昆仑发生造山作用, 柴达木地块及其边缘带结束了长期隆起状态, 形成块断沉降带, 为侏罗纪盆地的形成奠定了基础[5]。柴达木侏罗纪盆地以东昆仑构造带为界具有“北陆南洋”的古地理格局, 在早侏罗世, 柴达木地区处于印支造山期后的应力松弛状态, 受到周缘板块活动的影响, 祁连山和阿尔金山开始活动, 在柴达木地块上表现为近南北向的纵张断裂发育, 形成一些规模较小、分割性较强的断陷盆地, 主要张应力方向为 NWW-SEE 方向, 中侏罗世, 阿尔金断裂继续右旋走滑, 小断陷连接起来形成大断陷。晚侏罗世冈底斯地体往北与羌塘地体碰撞拼贴, 中特提斯洋闭合, 在强烈的挤压作用下, 阿尔金走滑的性质发生改变, 从右旋走滑转变为左旋走滑, 柴达木盆地以较强烈的近南北向伸展为特征。从早 - 中侏罗世到晚侏罗世, 断陷盆地的位置发生转移、方向发生变化, 盆地构造应力场表现为最大张应力方向从 NWW-SEE 方向转变为近南北向垂直方向, 应力集中中心也从柴北缘转移到柴东地区, 晚侏罗世这种应力状态一直持续到早白垩纪。

综上所述, 晚三叠纪末的东昆仑造山作用奠定中生代柴达木盆地的基础, 祁连山和阿尔金山活动使得 J_1-J_2 时期在柴北缘形成断陷盆地, 中特提斯洋闭合使得在 J_3-K_1 时期柴南昆仑山的活动加强, 使得应力场发生变化, 断陷盆地的边缘断层方向、位置发生变化, 在柴东形成断陷盆地。

5. 结论

- 1) 早侏罗世 - 中侏罗世, 柴达木盆地沉降中心位于柴北缘, 最大主应力集中分布在柴北缘, 主要是受到近 NWW 方向的张应力, 盆地性质为断陷盆地。
- 2) 晚侏罗世 - 早白垩世, 柴达木盆地沉降中心从柴北缘转移到柴东地区, 最大主应力集中分布地区也从柴北缘转移到柴东, 主要是受到近南北方向的张应力, 盆地性质也为断陷盆地。

3) 柴达木中生代盆地的形成机制与周缘地区大地构造背景密切相关, 主要受两方面因素控制, 一方面是受到柴西地区阿尔金走滑方向的影响, 另一方面是受到柴东地区与华北板块挤压、拼合的影响。

致谢

感谢审稿人的意见。

基金项目

感谢国家重大专项的支持。

参考文献

- [1] 夏文臣, 张宁, 袁晓萍, 孟科, 张兵山, 彭晓群. 柴达木侏罗系的构造层序及前陆盆地演化[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 173-181.
- [2] Ritts, B.D. and Biffi, U. (2001) Mesozoic Northeast Qaidam Basin: Response to Contractual Reactivation of the Qilian Shan, and Implications for the Extent of Mesozoic Intracontinental Deformation in Central Asia. *Memoirs-Geological Society of America*, **194**, 293-316. <https://doi.org/10.1130/0-8137-1194-0.293>
- [3] 和钟铎, 刘招君, 郭巍, 董清水. 柴达木北缘中生代盆地的成因类型及构造沉积演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002, 5(4): 333-339.
- [4] 靳久强, 赵文智, 薛良清, 孟庆任. 中国西北地区侏罗纪原型盆地与演化特征[J]. 地质论评, 1999, 45(1): 92-104.
- [5] 曾联波, 金之钧, 张明利, 汤良杰, 由福报, 雷兵足. 柴达木侏罗纪盆地性质及其演化特征[J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 288-292.
- [6] 冯乔, 付锁堂, 张小莉, 陈琰, 汪立群, 周飞, 等. 柴达木盆地及邻区侏罗纪原型盆地恢复及油气勘探前景[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 44-58.
- [7] 陈志勇, 肖安成, 周苏平, 何光玉. 柴达木盆地侏罗系分布的主控因素研究[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 149-155.
- [8] 楼谦谦, 肖安成, 杨浩, 黄宏升, 丁卫星, 沈中延, 等. 柴达木盆地北缘中生代盆地性质研究——对大柴旦凹陷的解剖[J]. 高校地质学报, 2009, 15(3): 407-416.
- [9] 汤良杰, 张一伟, 金之钧, 贾承造. 塔里木盆地、柴达木盆地的开合旋回[J]. 地质通报, 2004, 23(3): 254-260.
- [10] 商琳, 戴俊生, 杨学君, 夏瑞杰. 柴北缘东段构造应力场数值模拟及构造演化模式探讨[J]. 高校地质学报, 2014, 20(2): 260-267.
- [11] 任收麦, 葛肖虹, 刘永江, 乔德武, 尹成明, Neubauer, F., 等. 柴达木盆地北缘晚中生代 - 新生代构造应力场——来自构造节理分析的证据[J]. 地质通报, 2009, 28(7): 877-887.
- [12] 王冰, 刘成林, 李宗星, 郑策. 柴达木盆地东部中生代以来构造应力场及构造演化[J]. 地球科学与环境学报, 2017, 39(1): 83-94.
- [13] 杨惠心, 禹惠民, 李鹏武. 柴达木地块古地磁研究及其演化[J]. 长春地质学院学报, 1992(4): 420-426.
- [14] 吴汉宁, 刘池阳, 张小会, 任战利. 用古地磁资料探讨柴达木地块构造演化[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 1997(1): 9-14.
- [15] 余辉龙, 邓宏文, 胡勇. 从古地磁资料看柴达木盆地古构造环境[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(6): 41-44.
- [16] 黄宝春, 周姚秀, 朱日祥. 从古地磁研究看中国大陆形成与演化过程[J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 348-359.
- [17] Huang, B., Yan, Y., Piper, J.D.A., et al. (2019) Paleomagnetic Constraints on the Paleogeography of the East Asian Blocks during Late Paleozoic and Early Mesozoic Times. *Earth-Science Reviews*, **186**, 8-36. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.004>
- [18] 陈忠, 魏文彬, 曹璐, 金雅琪, 苗甜. 中生代之前柴达木的演化研究[J]. 盐湖研究, 27(1): 19-27.
- [19] 罗群. 柴达木盆地成因类型探讨[J]. 石油实验地质, 2008, 30(2): 115-120.
- [20] 王仁, 丁中一, 殷有泉. 固体力学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1979.
- [21] 王仁. 有限单元等数值方法在我国地球科学中的应用和发展[J]. 地球物理学报, 1994(S1): 128-139.
- [22] 谭晓慧, 宋传中, 查甫生, 李加好, 张妍. 数值模拟方法在构造变形研究中的应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2010, 33(12): 1851-1857.

-
- [23] Hou, G., Wang, C., Li, J., *et al.* (2006) Late Paleoproterozoic Extension and a Paleostress Field Reconstruction of the North China Craton. *Tectonophysics*, **422**, 89-98. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.05.008>
- [24] Li, J. and Hou, G. (2018) Cretaceous Stress Field Evolution and Origin of the Jiaolai Basin, Eastern North China. *Journal of Asian Earth Sciences*, **160**, 258-270. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.01.024>
- [25] Hou, G., Wang, Y. and Hari, K.R. (2009) The Late Triassic and Late Jurassic Stress Fields and Tectonic Transmission of North China Craton. *Journal of Geodynamics*, **50**, 318-324. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2009.11.007>
- [26] Pollard, D.D. (1987) Elementary Fractures Mechanics Applied to the Structural Interpretation of Dykes. In: Halls, H.C. and Fahrig, W.H. (Eds.), *Mafic Dyke Swarms*, Geological Association of Canada, St. John's, Special Paper No, 34, 5-24.
- [27] Giacomo, C., Marco, B., Sandro, C., *et al.* (2003) Analogue Modelling of Continental Extension: A Review Focused on the Relations between the Patterns of Deformation and the Presence of Magma. *Earth-Science Reviews*, **63**, 169-247. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(03\)00035-7](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00035-7)
- [28] Ju, W., Hou, G. and Zhang, B. (2014) Insights into the Damage Zones in Fault-Bend Folds from Geo-Mechanical Models and Field Data. *Tectonophysics*, **610**, 182-194. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.11.022>
- [29] Beer, F.P., Johnston, E.R., Dewolf, J.T. and Mazurek, D.F. (2012) *Mechanics of Materials*. Sixth Edition, McGraw-Hill Companies, New York, 758 p.
- [30] 吕宝凤, 张越青, 杨书逸. 柴达木盆地构造体系特征及其成盆动力学意义[J].地质论评, 2011, 57(2): 167-174.
- [31] 孙松岭, 张正刚, 荣光来, 石亚军, 侯栗丽, 王文卓. 阿尔金断裂带中段中生代盆地形成及演化[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(5): 528-535.