

DOI: 10. 16562/j. cnki. 0256-1492. 2017. 06. 007

南海北部莺歌海盆地成因机制： 与渭河盆地构造对比分析的启示

杨鹏¹, 夏斌^{1,2}, 蔡周荣¹, 万志峰¹, 黄强太¹, 张勇¹

(1. 中山大学海洋科学学院, 海洋石油勘探与开发广东高校重点实验室, 中山大学海洋石油勘探开发研究中心, 广州 510006;
2. 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

摘要:南海北部莺歌海盆地为新生代沉积盆地, 地处欧亚板块、太平洋板块和印度-澳大利亚板块交汇处, 构造位置独特, 复杂的地质构造现象使其形成演化的动力学机制成为国内外研究的热点。同一类型盆地具有相似的构造、沉降、沉积演化历史与成因机制。莺歌海盆地与渭河盆地均位于多板块交汇处, 存在长期相对快速沉积、沉降及构造演化迁移等典型走滑型盆地特征。在明确渭河盆地成因机制的基础上, 对比两盆地构造、沉降及沉积演化历史, 结合莺歌海盆地特殊的构造位置及南海扩张的构造背景, 分析得出: 莺歌海盆地形成演化和印度-澳大利亚板块与青藏板块碰撞、印支板块逃逸及自身旋转、华南板块向东挤出及太平洋板块俯冲关系密切, 受多板块构造活动影响较大, 新生代以来先后依次经历左旋走滑、伸展—热沉降—右旋走滑、伸展三大成盆演化期。另外, 与渭河盆地相比, 莺歌海盆地发育有高温、高压及泥底辟等特殊地质现象, 主要受控于热沉降阶段, 与渐新世以来(33~15 Ma)南海扩张事件具有重要关系。

关键词:构造沉降; 沉积演化; 成因机制; 盆地分析; 板块构造; 渭河盆地; 莺歌海盆地; 南海

中图分类号: P736.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0256-1492(2017)06-0065-11

南海是东特提斯多岛弧体系的重要组成部分之一, 地处欧亚板块、印度-澳大利亚板块与太平洋板块的交汇处^[1-4], 中生代以来的形成演化过程受特提斯构造域和太平洋构造域的联合作用, 形成了多种构造现象及构造单元, 发育多种形式地质体及相关矿产资源^[5], 被国内外学者誉为“地球上天然实验室”^[6,7]。莺歌海盆地为南海西北部沉积盆地, 紧邻印度-澳大利亚板块与欧亚板块, 受多板块活动的影响, 莺歌海盆地形成演化历史及成因机制复杂, 加之其独特且重要的大地构造位置, 一直是国内外学者研究的热点及争论的焦点。渭河盆地与莺歌海盆地均处于多板块交汇处, 均为受多板块活动影响形成的新生代走滑型伸展盆地, 二者在沉积、构造等多方面具有相似性。本次研究主要运用盆地分析法, 对比渭河盆地与莺歌海盆地构造、沉降及沉积演化等

方面的特征, 结合南海北部特殊的构造位置及大地构造背景探讨莺歌海盆地成因机制。

1 区域地质背景

莺歌海盆地位于海南岛西南缘, 中南半岛以东, 介于 14°30′~21°17′ N、105°22′~109°40′ E 之间, 盆地整体为菱形, 呈 NNW 向条带状展布^[8-10](图 1a), 长约 805 km, 最宽处可达 200 km, 面积约为 12.7×10⁴ km², 沉积物最厚可达 17 km^[10,11]。盆地地处欧亚板块、印度-澳大利亚板块和太平洋板块的交汇地区, 是受①号大断裂及红河大断裂向海外的延伸段控制形成的走滑型伸展盆地^[12](图 1)。受多板块构造活动的影响, 莺歌海盆地构造背景复杂, 受控于大型走滑断层, 存在沉积-沉降中心迁移、异常地层压力及超压现象明显等特征, 发育有强烈的泥底辟活动、巨厚沉积盖层、快速的沉积充填史、异常高温高压地层系统等地质现象^[10,13-15]。

渭河盆地又称关中盆地, 介于 34°10′~35°10′ N、107°10′~110°20′ E 之间, 地势西高东低、西窄东宽, 东到潼关, 西起宝鸡, 南至秦岭, 北接北山^[16], 海拔 325~600 m, 东西长约 300 km, 盆地面积约 2.1×10⁴ km²^[17](图 1b)。渭河盆地地处青藏地区东北缘、华北板块与华南板块的交汇处(图 1), 主要

基金项目:国家自然科学基金(41372208, 40534019); 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室开放基金(201304); 广东省自然科学基金(2015A030313157)

作者简介:杨鹏(1990—), 男, 博士研究生, 海洋地质专业, 主要从事岩石圈构造与海洋油气勘探开发(含油气盆地分析方向)研究, E-mail: 13909263435@163.com

通讯作者:夏斌(1959—), 男, 研究员, 博士生导师, 构造地质学专业, E-mail: xb698xy@qq.com

收稿日期:2017-05-30; **改回日期:**2017-07-05. 蔡秋蓉编辑

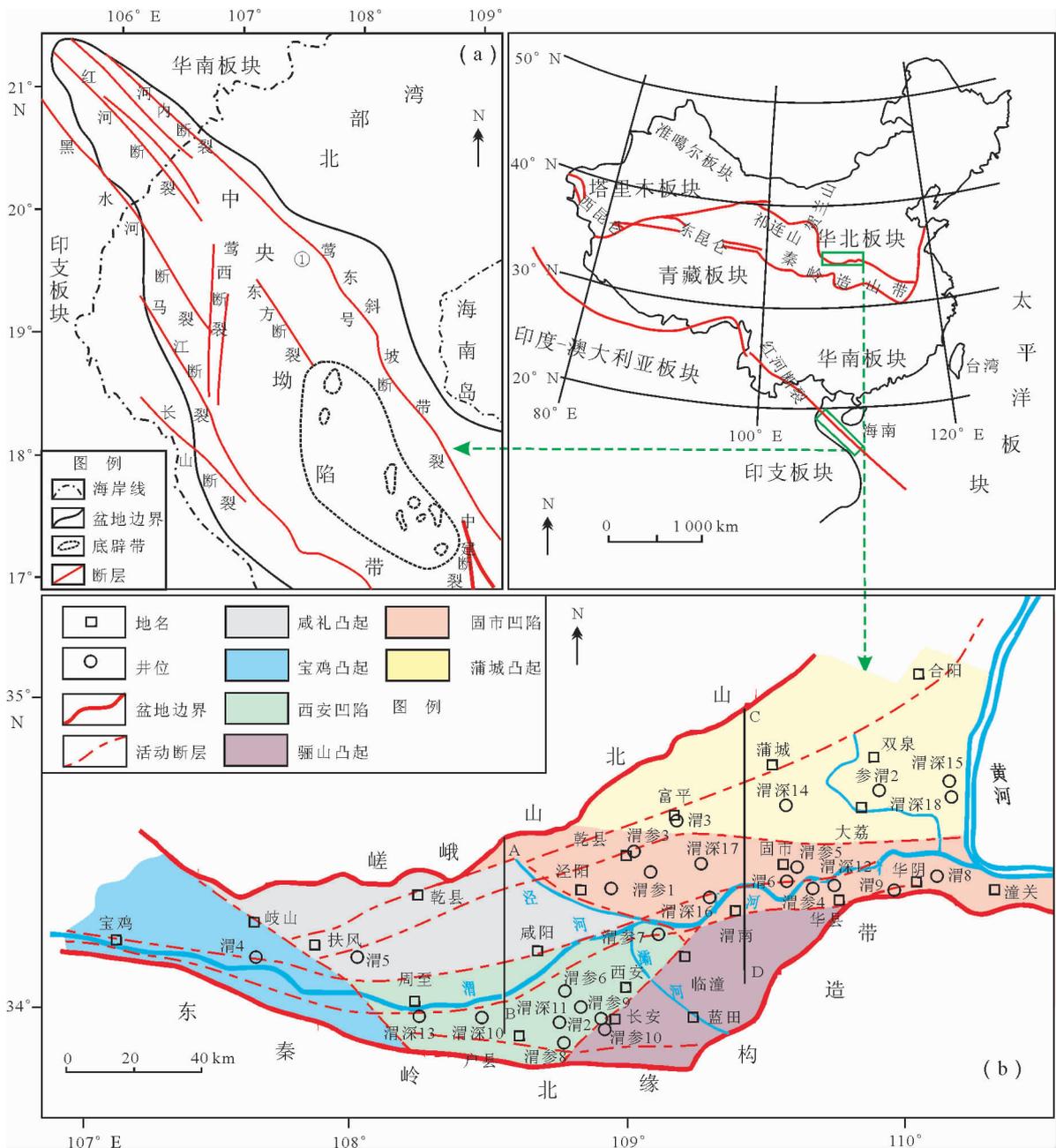


图1 研究区构造位置图

Fig.1 Tectonic location of the study area

是由喜山期构造运动形成的新生代走滑伸展型盆地,发育“两凹四凸”的构造格局,具有典型的双层结构,新生代沉积物总厚度可达 $5\sim 7\text{ km}$ ^[16,18,19]。盆地地温及地温梯度较高,地热田发育^[20],新生代持续、快速充填^[21],且沉积沉降中心发生迁移^[18]。

盆地作为岩石圈表面发育的基本构造单元之一^[22],其沉积、构造演化过程受地球深部岩石圈动力控制^[23,24],相同性质、相似沉积构造演化历史的盆地具有相似或者相同的成因机制。渭河盆地与莺歌海盆地均处于多板块交汇处,受周缘板块活动的影响其沉积构造形成历史复杂,虽然各具特点,但是

在盆地性质、沉积构造演化历史及沉积盖层、地温及地温梯度、沉降-埋藏史、沉积沉降中心迁移等方面存在诸多相似之处,两者成因机制存在一定程度相似性。

2 盆地成因机制的认识

2.1 渭河盆地成因机制

自19世纪末以来,国内外学者在渭河盆地做了大量研究^[18],对渭河盆地成因机制形成了较为明确

的认识。晚白垩世—古新世前,秦岭造山带向北挤压导致渭河地区发生挤压隆升,形成一系列东西向及配套伴生的北西、北东向压性断裂,地层遭受剥蚀,上地幔隆起,地壳减薄,为盆地热沉降前的原始状态^[25]。在青藏板块向东扩展及太平洋板块俯冲作用下,华北板块发生逆时针旋转^[26],渭河盆地同时受南部秦岭造山带隆升、挤压及鄂尔多斯地块旋转的影响,渭河地区挤压性应力场转换为张性应力场。始新世—渐新世,周缘板块的持续活动导致渭河盆地发生走滑拉分,盆地雏形初步形成,沉积物开始堆积。新近纪以来是渭河盆地主要沉降期,以拉张伸展及差异升降为主,盆地的沉积、沉降与周缘构造单元秦岭造山带和鄂尔多斯盆地南缘渭北隆起的快速隆升耦合关系明显^[21],在多板块构造活动及盆山体系相互作用下,渭河盆地快速充填形成厚度较大的沉积盖层,此时盆地基本成型。第四纪以来,由于青藏高原的持续隆升外扩、盆缘构造单元渭北隆起及秦岭造山带的持续隆升,同时上隆的莫霍面发生重力均衡的补偿作用,密度相对较小的地壳发生镜像下凹,加剧盆地沉降,使得渭河盆地发生继承性伸展活动,持续拉张伸展及差异升降,形成了现今较厚的沉积物及“两凹四凸”的构造格局(图 1b)。整体而言,相邻的多板块构造活动及周缘构造单元的隆升挤压是渭河盆地走滑、伸展、裂陷的主要原因^[27],是渭河盆地成因机制的重要组成部分。

2.2 莺歌海盆地成因机制

青藏高原的隆升及南海海盆的扩张一直是国内学者研究的热点及难点问题,莺歌海盆地所处区域特殊,成因机制的重要性不言而喻。目前,关于莺歌海盆地成因机制争议较大,概括起来主要有以下两种认识:

(1) 拉张、伸展、裂陷成盆

丁中一等^[28]运用地震资料及单井资料恢复了盆地埋藏史和热沉降史,证实了莺歌海盆地具有 Mckenzie 模型拉张盆地特征,热沉降反演的拉张因子得出盆地新生代以来发生过多期拉张事件,且拉张事件的时间与南海扩张的时间基本吻合,南海大陆边缘盆地构造演化与南海扩张耦合关系明显^[29],莺歌海盆地是受南海多期扩张事件影响的拉张—伸展—裂陷盆地,与东部裂陷式成盆机制相似。

(2) 走滑、拉分、裂陷成盆

Tapponnier 等^[30]根据刚性体挤入代用黏土模拟实验提出印藏碰撞引起印支板块沿南东方向挤出,产生侧向滑移,哀牢山—红河剪切带及青藏高原

以东的走滑断裂带的研究成果进一步证实了红河断裂的走滑性质^[8,30-33]。茹克^[34]根据盆地发育特点及所处大地构造环境分析得出莺歌海盆地是受北西、北西西向的左旋张剪应力场控制的走滑盆地。孙家振等^[35]认为盆地在裂陷阶段受红河断裂活动的影响,莺歌海盆地作为南海大陆北缘的一部分经历了二期右行走滑。目前大多数学者认为,莺歌海盆地新生代以来先后经历了左行走滑阶段和右行走滑阶段,是受周缘板块活动、南海海盆的扩张及岩石圈地幔上涌等多种因素影响形成的走滑型伸展盆地^[11,36-39]。

3 盆地构造、沉降及沉积演化对比分析

不同类型、不同性质盆地由于沉积、构造演化过程不同,形成机制各异,其沉降曲线也会表现出不同特征,与导致盆地沉降的动力学背景密切相关,通过对比分析盆地构造沉降特征、沉积演化历史可以在一定程度上明确盆地类型及成因机制^[40]。

3.1 盆地构造沉降史对比

盆地的构造沉降是盆地基底相对于某一基准面的沉降,常用沉降幅度和沉降速率来定量表示盆地构造沉降特征^[2]。回剥法(backstripping)是恢复盆地基底沉降量的重要方法^[41-47]。刘护军以钻孔资料为基础,利用回剥法恢复了渭河盆地新生代以来的构造沉降史^[47];吴能友等、钟志洪等对莺歌海盆地新生代以来的构造沉积特征进行了深入分析^[39,48]。

渭河盆地主要沉降期始于古近纪(约 40 Ma),早期沉降主要集中在盆地西南部的西安凹陷。渐新世末期到早中新世(约 24 Ma),西安凹陷进入快速沉降阶段,盆地东北部固市凹陷及蒲城凸起开始沉降。中新世(约 13 Ma)开始,东北部固市凹陷和蒲城凸起开始分异,固市凹陷沉降速率大于蒲城凸起。2.6 Ma 至今,渭河盆地整体处于持续快速沉降阶段(图 2a、图 2b)。

莺歌海盆地主要沉降集中在盆地中部,沉降期始于古近纪(约 50 Ma)。始新世早期到中新世(50~15.5 Ma),盆地整体发生快速沉降。中新世(15.5~10.5 Ma)盆地处于差异沉降阶段,北部以缓慢沉降为主,中南部仍以快速沉降为主。晚中新世(约 10.5 Ma)以来,盆地整体以快速沉降为主(图 2c、图 2d)。莺歌海盆地构造沉降史与渭河盆地类似,均具有长期相对快速沉降的特征,盆地整体的缓阶段缺失,具有典型的走滑拉分盆地沉降特征^[39,49]。

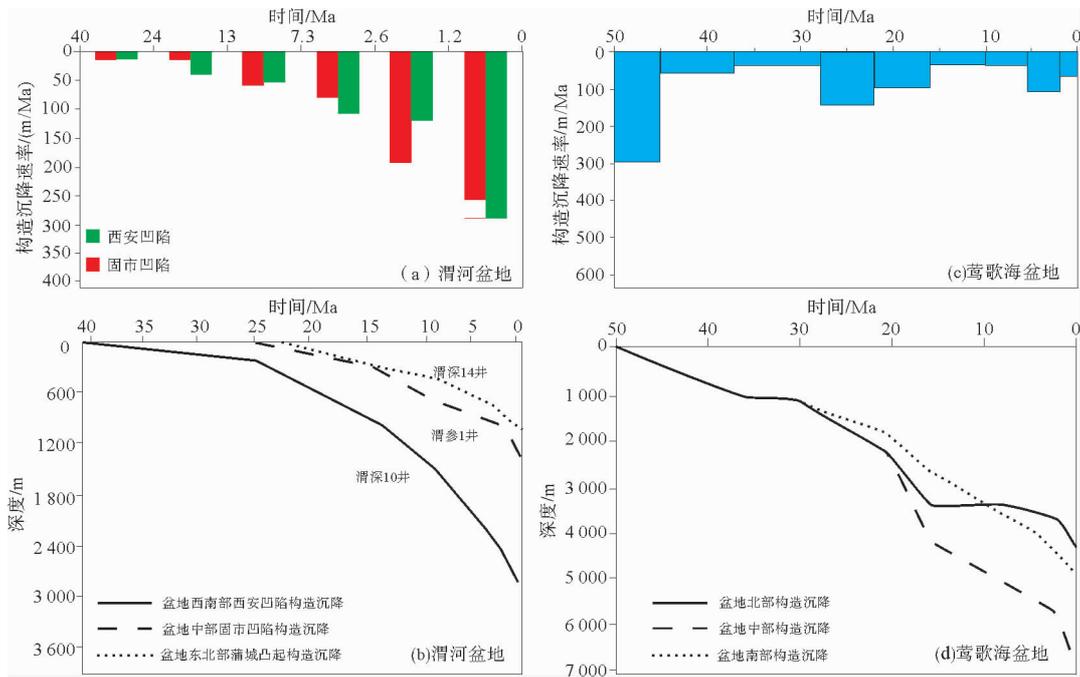


图2 渭河盆地与莺歌海盆地沉降特征对比(据文献[11,39,47]修改)

Fig. 2 Comparison of subsidence characteristics between Weihe and Yinggehai Basins

3.2 盆地沉积演化历史对比

沉积物是盆地沉积、沉降、构造演化的产物,以实测沉积物厚度或多井位地层分层数据为基础的地层厚度等值线可近似作为盆地演化的等深线替代标志,基于各组地层厚度等值线图来分析盆地沉积演化历史的方法应用广泛且较为合理^[50]。

黄保家等和任战利等以钻井地层厚度数据为依托,分别选取莺歌海盆地中央坳陷乐东22-1S和渭河盆地西安凹陷户县地区较深的渭深10井为典型

井,恢复了各盆地埋藏史^[21,51](图3),结合莺歌海盆地不同时期沉积、沉降中心的变化^[2,15,36]及渭河盆地不同演化阶段沉积厚度等值线图,重建盆地沉积演化历史(图4)。

莺歌海盆地与渭河盆地均为新生代走滑型伸展盆地,对比分析两盆地典型井埋藏史图(图3)发现:古近纪以来,两盆地均持续快速沉降,沉积物堆积速度快。莺歌海盆地经历了早期的快速沉降阶段,约5 Ma发生加速沉降,沉积物最大埋藏深度约13 km。渭河盆地经历了约40 Ma以来的快速沉降

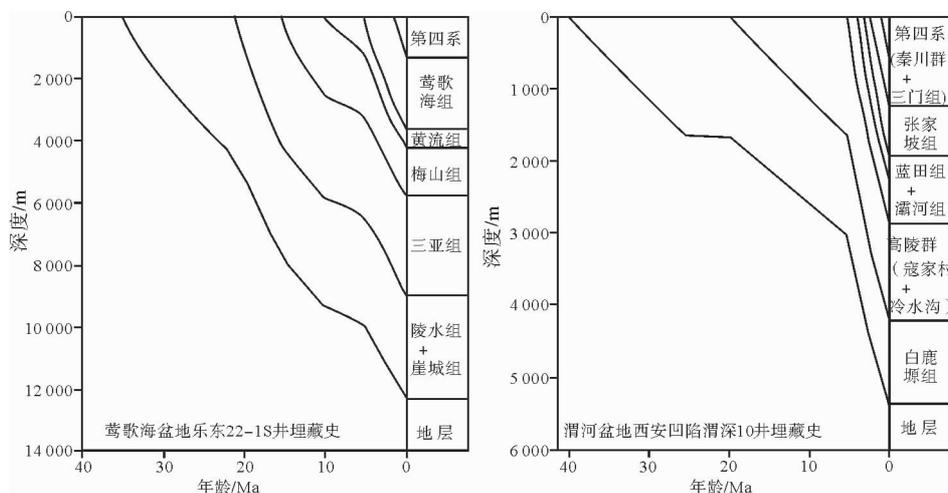


图3 盆地典型井埋藏史对比(据文献[21,47]修改)

Fig. 3 Comparison of burial history of typical wells between Yinggehai and Weihe Basins

阶段并在 5 Ma 左右发生加速沉降,同莺歌海盆地一样,新生代也发育较厚的沉积物,其位于西安凹陷户县附近的典型井渭深 10 井最大埋藏深度超过 5 km。新生代是莺歌海盆地和渭河盆地沉积物快速充填阶段,也是两盆地形成演化的主要时期,两者经历了相似的沉积演化历史。

渭河盆地新近纪以来依次沉积了中新统高陵群、上新统蓝田灞河组、张家坡组及第四系。中新世以西南方向西安凹陷沉积为主,最大沉积厚度可达 1.4 km,固市凹陷基本没有接受沉积(图 4a)。早上新世蓝田灞河组沉积期,西安凹陷与固市凹陷同时接受沉积,西安凹陷沉积厚度为 0.9 km,固市凹陷沉积厚度最大可达 0.8 km(图 4b)。西安凹陷高陵群-蓝田灞河组总沉积厚度超过 2.3 km,固市凹陷

高陵群-蓝田灞河组总沉积厚度可达 1.5 km(图 4c),此时,盆地沉积、沉降中心整体仍然偏西南方向的西安凹陷。晚上新世张家坡组沉积期,西安凹陷继承性接受沉积,张家坡组沉积厚度可达 1.3 km,固市凹陷的沉积范围扩大,张家坡组沉积最大厚度可达 1.1 km(图 4d)。西安凹陷新近纪以来高陵群-张家坡组总沉积厚度可达 3.6 km,固市凹陷新近纪以来高陵群-张家坡组总沉积厚度超过 2.6 km(图 4e),盆地沉积、沉降中心明显向北东方向迁移。第四纪以来,渭河盆地沉积范围进一步扩大,各凹陷第四系最大沉积厚度均超过 1 km(图 4f),西安凹陷新近纪以来沉积物最大厚度超过 4.6 km,固市凹陷新近纪以来沉积物最大厚度超过 3.8 km(图 4g),盆地沉积、沉降中心继续向北东方向迁移,并逐步发展

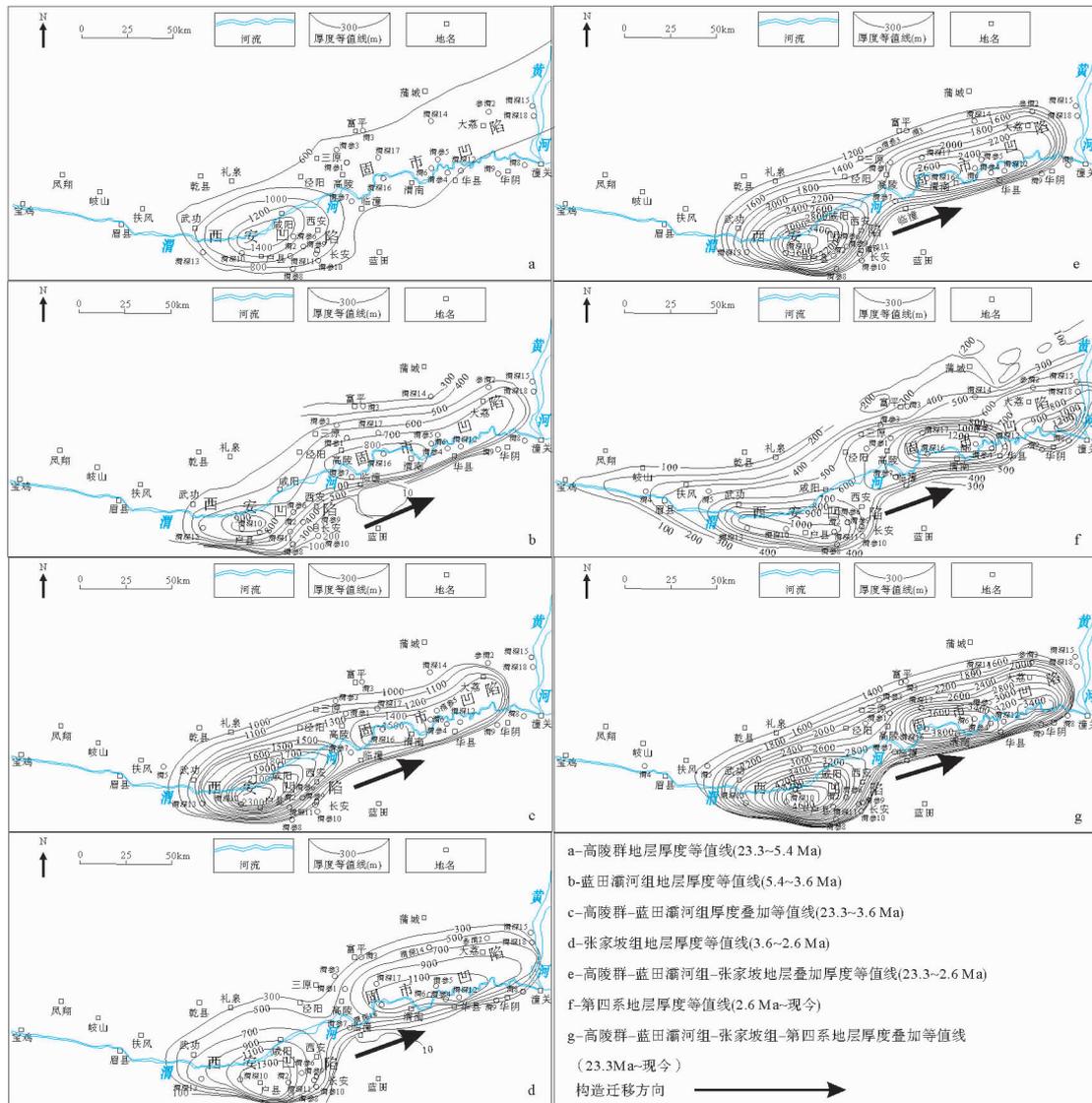


图 4 渭河盆地新生代沉积演化历史及构造迁移规律

Fig. 4 Cenozoic depositional history and tectonic migration of Weihe basin

为两个次一级沉积、沉降中心(图 4f、图 4g)。

莺歌海盆地作为南海北部海盆的重要组成部分,其沉积演化历史一定程度上受南海形成演化的控制。夏斌等^[2]在南海区域大背景下,对南海北部莺歌海盆地、琼东南盆地、北部湾盆地、珠江口盆地、台西盆地及台西南盆地的构造沉降特征及沉积构造时序特征的研究表明:南海北部不同盆地构造事件发生的时间不同,形成演化受红河断裂影响发生自北而南的迁移特征(图 5a)。红河大断裂是盆地北部基底断裂,①号大断裂为中央坳陷带控拗断裂,二者对盆地沉积演化历史起到重要控制作用,晚始新世以来,莺歌海盆地中央坳陷带沉积、沉降中心自北西向东南方向迁移^[15,36]。晚始新世到渐新世(36.0~21.0 Ma),沉积、沉降中心主要集中在盆地西北部莺西断裂带。渐新世末期到中新世晚期(21.0~5.5 Ma),盆地沉积、沉降中心开始向东北方向迁移,主要沉积、沉降中心呈北西向狭长带状展布,广泛发育泥底辟带。中新世末期以来(约 5.5 Ma),沉积、沉降中心主要集中在莺歌海盆地西南方向(图 5b)。莺歌海盆地与渭河盆地长期相对快速的构造沉降控制了盆地沉积、构造演化历史,两盆地同时存在沉积、构造演化迁移的规律,是走滑型盆地又一典型特征。

4 讨论

盆地作为岩石圈表面发育的重要基本构造单元之一,与岩石圈及深部物质的演化具有密切联系^[22,52],其构造、沉降及沉积演化历史同时受控于

盆地类型与盆地深部的动力学成因机制^[41]。莺歌海盆地与渭河盆地同为走滑型伸展盆地,大地构造位置分别位于华南板块的南部与北部,西部均为青藏板块,东部同时受太平洋板块俯冲的影响,成因机制具有一定的相似性。

印度板块与欧亚板块的碰撞始于新生代始新世(45~55 Ma),导致青藏高原快速隆升的同时向外挤出^[53],紧邻华南板块北缘的秦岭造山带在 40~33 Ma 快速隆升并向北挤压,同时华北板块南缘鄂尔多斯盆地渭北地区于 45~32 Ma 整体快速隆升,是导致渭河盆地走滑拉分并于 40 Ma 左右发生快速沉降的重要原因。渐新世以来,青藏高原于 25~17、13~8 Ma、约 3 Ma 发生阶段性快速隆升,并于 10 Ma 左右东北缘开始扩展波及到北东构造结^[20,54,55],秦岭在 10~5 Ma 整体快速隆升^[56]及鄂尔多斯盆地南缘渭北隆起约 5.6 Ma 以来的整体快速隆升事件^[21,57]是对该事件的远程响应。同时受太平洋板块俯冲作用的影响,鄂尔多斯地块发生逆时针旋转^[26],环鄂尔多斯地块形成强烈的区域拉张应力场导致渭河盆地内断裂活动加剧,断陷活动强烈,渭河盆地构造沉降作用加强^[19,20]。新生代以来,青藏高原的快速隆升及外扩是导致华北板块南缘鄂尔多斯盆地渭北地区及东秦岭抬升的重要原因。秦岭和渭北地区的抬升对渭河盆地近南北向的挤压及太平洋板块东西向的俯冲作用对区域应力的影响是渭河盆地走滑伸展的重要原因。盆地周缘构造单元的快速隆升与渭河盆地的快速沉降造成的巨大高差,加剧了盆地周缘的剥蚀作用,为渭河盆地巨

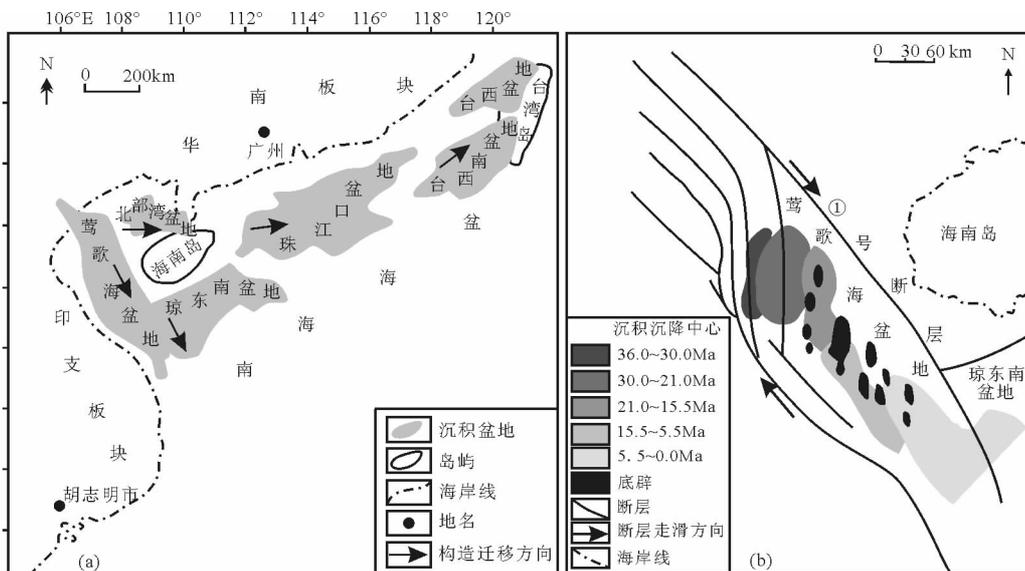


图 5 南海北部海盆(a)及莺歌海盆地(b)构造迁移规律(据文献[2,15,36]修改)

Fig. 5 Tectonic migration of Yinggehai Basin (a) and Northern South China Sea Basins (b)

厚沉积物快速堆积提供物质基础。整体而言,渭河盆地构造、沉降及沉积演化过程是地表作用对深部岩石圈的反馈,成因机制是对多板块构造活动的响应。

红河断裂带是印-澳板块与华南板块的分界构造带,受印-澳板块与青藏板块的碰撞的影响新生代发生了显著的构造变形^[32,58],南海北部莺歌海盆地河内凹陷基底断裂带为红河断裂带的延伸,盆地成因机制和印-澳板块与青藏板块碰撞过程及南海形成演化有关^[39]。如前所述,莺歌海盆地成因机制大体存在受南海多期扩张事件影响的拉张-伸展-裂陷盆地的“东部裂陷式成盆”机制和印-澳板块与青藏板块碰撞引起的“构造逃逸”及印支板块自身的旋转导致“走滑伸展成盆”两种观点。对比分析莺歌海盆地与渭河盆地构造、沉降及沉积演化过程的相似性,莺歌海盆地周缘多板块构造活动对盆地的形成演化起到重要作用。

古新世到早渐新世,受印-澳板块与青藏板块北东向碰撞影响,印支板块快速向南东方向挤出,发生构造逃逸的同时伴随着自身的顺时针旋转^[37],在红河断裂带附近产生剪切拉张应力场,该时期印澳板

块还没有嵌入到青藏板块,华南板块相对稳定,红河断裂带发生左旋走滑运动,为莺歌海盆地左旋走滑、伸展成盆期(图 6a)。早渐新世末期,印藏碰撞方向转为正北方向,造成岩石圈加厚,印支板块挤出受阻,莺歌海盆地走滑作用减弱,盆地周缘板块运动引起的深部物质向周围挤出。渐新世开始,太平洋板块与欧亚板块汇聚速率上升,到中新世晚期再次增大^[37,59,60],印度-澳大利亚板块正北方向的运动与太平洋板块的快速俯冲,阻碍深部物质向南东方向流动,导致深部地幔物质在南海地区上涌,这与南海在渐新世到中新世(33~15 Ma)的扩张事件^[6,7,28,61-63]吻合较好(图 6b)。该时期受南海扩张的影响,盆地整体处于热沉降阶段,沉积物快速堆积,沉积、沉降中心向南东方向迁移,同时也是莺歌海盆地泥底辟等特殊地质现象发育的重要时期^[8],是造成莺歌海盆地有别于渭河盆地的重要原因。自中新世晚期到上新世,印度板块楔入欧亚板块内部,印藏碰撞由早期的软碰撞变成硬碰撞,导致华南板块挤出速度超过印支板块^[37],红河断裂带发生右旋走滑作用,莺歌海盆地处于右旋走滑、伸展成盆期(图 6c)。

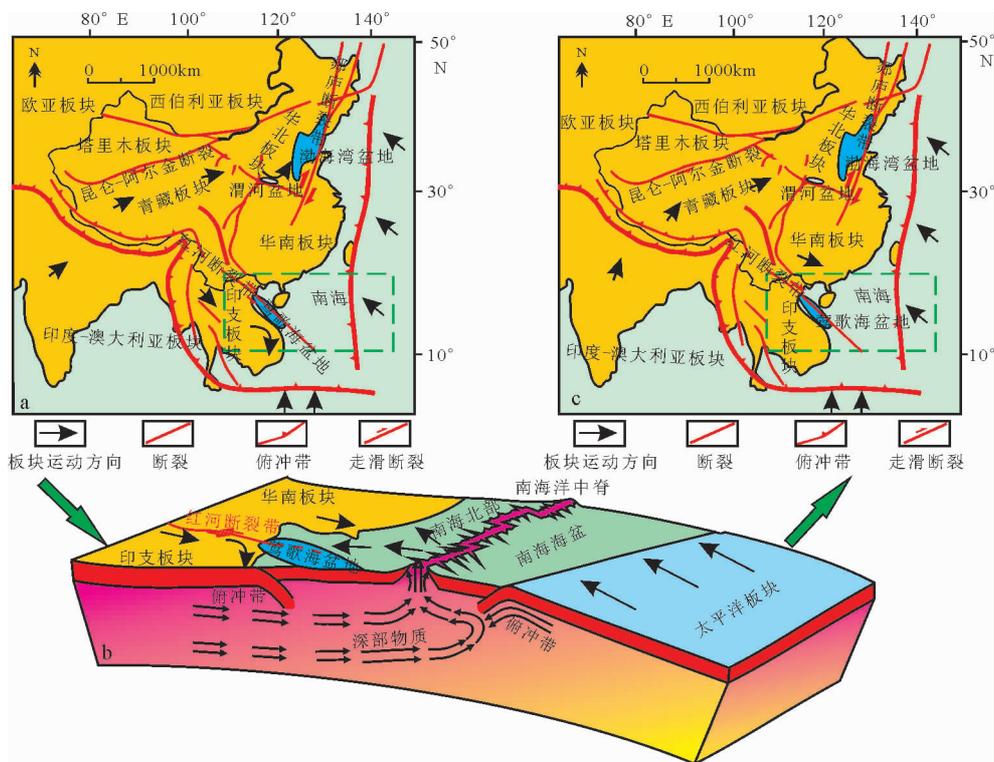


图 6 南海北部莺歌海盆地成因机制演化模式

- a. 莺歌海盆地左旋走滑及鄂尔多斯地块逆时针旋转模式图(据文献[8,13,14,26]修改);
- b. 莺歌海盆地热沉降阶段模式图;c. 莺歌海盆地右旋走滑模式图(据文献[8,13,14]修改)

Fig. 6 Dynamics model for evolutionary mechanism of Yinggehai Basin, North of South China Sea Basins
a. Sinistral strike-slip Model for Yinggehai Basin and counterclockwise rotation model for Ordos block;
b. Model of thermal subsidence for Yinggehai Basin;c. Model of dextral strike-slip for Yinggehai Basin

南海北部莺歌海盆地与华南板块北部的渭河盆地同为走滑型伸展盆地,盆地类型及成因机制相似。渭河盆地形成演化受青藏板块、华南板块及华北板块构造活动影响较大。类比于渭河盆地成因机制再综合南海北部构造位置及莺歌海盆地邻区板块构造活动的大地构造背景,认为莺歌海盆地新生代以来先后经历了左旋走滑、伸展-热沉降-右旋走滑、伸展三大成盆演化期。莺歌海盆地与渭河盆地相比,发育高温、高压及泥底辟等特殊地质现象,这些特殊地质现象的形成主要受控于热沉降阶段,与南海渐新世以来(33~15 Ma)的扩张事件具有重要关系。

5 结论

(1)莺歌海盆地与渭河盆地均位于多板块交汇处,存在长期相对快速沉降、整体缓慢沉降阶段缺失、沉积构造演化迁移等典型走滑型伸展盆地的特征。

(2)多板块构造活动及周缘构造单元的隆升、挤压是造成渭河盆地走滑、伸展、裂隙的主要原因,是渭河盆地成因机制的重要组成部分。莺歌海盆地与渭河盆地成因机制类似,受多板块构造活动影响较大。新生代以来,莺歌海盆地依次经历左旋走滑、伸展-热沉降-右旋走滑、伸展三大成盆演化期。

(3)莺歌海盆地有别于渭河盆地发育有高温、高压及泥底辟等地质现象,这些特殊地质现象的形成主要受控于热沉降阶段,与渐新世以来(33~15 Ma)南海扩张事件具有重要关系。

参考文献(References)

- [1] 夏斌, 崔学军, 谢建华, 等. 关于南海构造演化动力学机制研究的一点思考[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(3): 221-227. [XIA Bin, CUI Xuejun, XIE Jianhua, et al. Thinking about the dynamics mechanism study on formation and evolution of South China Sea[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2004, 28(3): 221-227.]
- [2] 夏斌, 吕宝凤, 吴国干, 等. 南海北部新生代盆地构造迁移及其对烃源岩的制约作用[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(5): 629-634. [XIA Bin, LV Baofeng, WU Guogan, et al. The Cenozoic tectonic transport and its control on the source rock in the Northern South China Sea[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(5): 629-634.]
- [3] 刘海龄, 阎贫, 张伯友, 等. 南海前新生代基底与东特提斯构造域[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(1): 15-28. [LIU Hailing, YAN Pin, ZHANG Boyou, et al. Pre-Cenozoic basements of the South China Sea and Eastern Tethyan realm[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(1): 15-28.]
- [4] 朱荣伟, 刘海龄, 姚永坚, 等. 南海中-西沙地块前新生代构造变形特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(2): 67-74. [ZHU Rongwei, LIU Hailing, YAO Tongjian, et al. A preliminary analysis of Pre-Cenozoic tectonic deformation of Zhongsha-Xisha block in South China sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2017, 37(2): 67-74.]
- [5] 夏斌, 崔学军, 张宴华, 等. 南海扩张的动力学因素及其数值模拟讨论[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(3): 328-333. [XIA Bin, CUI Xuejun, HANG Yanhua, et al. Dynamic factors for the opening of south China sea and a numerical modeling discussion[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2005, 29(3): 328-333.]
- [6] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea Basin[M]//Hayes D E. The Tectonics and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Part 2. Washington DC: American Geophysical Union, 1983, 27: 23-56.
- [7] Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1993, 98(B4): 6299-6328.
- [8] 万志峰, 夏斌, 徐立峰, 等. 莺歌海盆地构造演化动力学机制探讨[J]. 海洋通报, 2010, 29(6): 654-657. [WAN Zhifeng, XIA Bin, XU Lifeng, et al. Study on the dynamic mechanism of tectonic evolution in Yinggehai Basin[J]. Marine Science Bulletin, 2010, 29(6): 654-657.]
- [9] 宋维宇. 莺歌海盆地反转构造变形特征及其动力学演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(2): 77-83. [SONG Weiyu. Characteristics and dynamic evolution of inverted structure in Yinggehai basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(2): 77-83.]
- [10] 万志峰, 夏斌, 何家雄, 等. 南海北部莺歌海盆地与琼东南盆地油气成藏条件比较研究[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(5): 648-652. [WAN Zhifeng, XIA Bin, HE Jiaxiong, et al. The comparative study of hydrocarbon accumulation conditions in Yinggehai and Qiongdongnan basins, northern South China Sea[J]. Nature Gas Geoscience, 2007, 18(5): 648-652.]
- [11] 孙向阳, 任建业. 莺歌海盆地形成与演化的动力学机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(4): 45-50. [SUN Xiangyang, REN Jianye. Dynamical mechanism for generation and evolution of Yinggehai basin, the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(4): 45-50.]
- [12] 李晓唐, 何家雄, 张伟. 莺歌海盆地古新近系烃源条件与有利油气勘探方向[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(2): 129-142. [LI Xiaotang, HE Jiaxiong, ZHANG Wei. The synthetic evaluation of paleogene and neogene source rocks and the favorable exploration target in Yinggehai basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(2): 129-142.]

- [13] 万志峰,夏斌,林舸,等. 莺歌海盆地与济阳拗陷成因机制与沉积特征的比较及其油气勘探意义[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2011, 41(4): 976-982. [WAN Zhifeng, XIA Bin, LIN Ge, et al. Comparative study of the formation mechanism and sedimentary characteristic between Yinggehai Basin and Jiyang depression and its significance for petroleum exploration[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(4): 976-982.]
- [14] Wan Z F, Xia B, Lv B F, et al. Yinggehai Basin gas exploration: comparison with Jiyang Depression[J]. Journal of Earth Science, 2012, 23(3): 359-372.
- [15] 郝芳,董伟良,邹华耀,等. 莺歌海盆地汇聚型超压流体流动及天然气晚期快速成藏[J]. 石油学报, 2003, 24(6): 7-12. [HAO Fang, DONG Weiliang, ZOU Huayao, et al. Overpressure fluid flow and rapid accumulation of natural gas in Yinggehai basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(6): 7-12.]
- [16] 彭建兵. 渭河断裂带的构造演化与地震活动[J]. 地震地质, 1992, 14(2): 113-120. [PENG Jianbing. Tectonic evolution and seismicity of Weihe fault zone[J]. Seismology and Geology, 1992, 14(2): 113-120.]
- [17] 权新昌. 渭河盆地断裂构造研究[J]. 中国煤田地质, 2005, 17(3): 1-4, 8. [QUAN Xinchang. Weihe basin faulted structure study[J]. Coal Geology of China, 2005, 17(3): 1-4, 8.]
- [18] 王斌,郑洪波,王平,等. 渭河盆地新生代地层与沉积演化研究:现状和问题[J]. 地球科学进展, 2013, 28(10): 1126-1135. [WANG Bin, ZHENG Hongbo, WANG Ping, et al. The cenozoic strata and depositional evolution of Weihe Basin: progresses and problems[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(10): 1126-1135.]
- [19] 饶松,李卫卫,姜光政,等. 咸阳地热田钻孔温度测量及水动力系统[J]. 地质科学, 2015, 50(3): 982-1000. [RAO Song, LI Weiwei, JIANG Guangzheng, et al. Borehole temperature logging and water dynamic system in the Xianyang geothermal field, Northwest China[J]. Chinese Journal of Geology, 2015, 50(3): 982-1000.]
- [20] 饶松,姜光政,高雅洁,等. 渭河盆地岩石圈热结构与地热田热源机理[J]. 地球物理学报, 2016, 59(6): 2176-2190. [RAO Song, JIANG Guangzheng, GAO Yajie, et al. The thermal structure of the lithosphere and heat source mechanism of geothermal field in Weihe Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(6): 2176-2190.]
- [21] 任战利,崔军平,郭科,等. 鄂尔多斯盆地渭北隆起抬升期次及过程的裂变径迹分析[J]. 科学通报, 2015, 60(14): 1298-1309. [REN Zhanli, CUI Junping, GUO Ke, et al. Fission-track analysis of uplift times and processes of the Weihe Uplift in the Ordos Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(14): 1298-1309.]
- [22] 刘少峰,张国伟. 盆山关系研究的基本思路、内容和方法[J]. 地质前缘, 2005, 12(3): 101-111. [LIU Shaofeng, ZHANG Guowei. Fundamental ideas, contents and methods in study of basin and mountain relationships[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 101-111.]
- [23] 林畅松,夏庆龙,施和生,等. 地貌演化、源-汇过程与盆地分析[J]. 地质前缘, 2015, 22(1): 9-20. [LIN Changsong, XIA Qinglong, SHI Hesheng, et al. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 9-20.]
- [24] Leeder M R. Sedimentary basins: Tectonic recorders of sediment discharge from drainage catchments[J]. Earth Surface Process and Landforms, 1997, 22(3): 229-237.
- [25] 张明升. 渭河盆地氦气成藏特征初步研究[D]. 西安:西北大学硕士学位论文, 2014. [ZHANG Mingsheng. The preliminary analysis of helium reservoir forming characteristics in Weihe Basin[D]. Xi'an: Master's Thesis of Northwest University, 2014.]
- [26] 张培震,邓起东,张竹琪,等. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J]. 中国科学:地球科学, 2013, 43(10): 1607-1620. [ZHANG Peizhen, DENG Qidong, ZHANG Zhuqi et al. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China[J]. Scientia Sinica Terrae, 2013, 43(10): 1607-1620.]
- [27] 王存诚. 论渭河地堑[J]. 地质学报, 1965, 45(2): 153-164. [WANG Cuncheng. On the Weihe graben[J]. Acta Geological Sinica, 1965, 45(2): 153-164.]
- [28] 丁中一,杨小毛,马莉,等. 莺歌海盆地拉张性质的研究[J]. 地球物理学报, 1999, 42(1): 53-61. [DING Zhongyi, YANG Xiaomao, MA Li, et al. A study of the stretching behavior of the Yinggehai basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(1): 53-61.]
- [29] 解习农,任建业,王振峰,等. 南海大陆边缘盆地构造演化差异性及其与南海扩张耦合关系[J]. 地质前缘, 2015, 22(1): 77-87. [XIE Xinong, REN Jianye, WANG Zhenfeng, et al. Difference of tectonic evolution of continental marginal basins of South China Sea and relationship with SCS spreading[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 77-87.]
- [30] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. Geology, 1982, 10(12): 611-616.
- [31] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China[J]. Nature, 1990, 243(6257): 431-437.
- [32] Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, et al. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina[J]. Tectonophysics, 1995, 251(1-4): 3-10, 13-84.
- [33] Lacassin R, Malushi H, Leloup P H, et al. Tertiary diachronic extrusion and deformation of western Indochina: Structural and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ evidence from NW Thailand[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1997, 102(B5): 10013-10037.
- [34] 茹克. 南海北部边缘叠合式盆地的发育及其大地构造意义[J]. 石油与天然气地质, 1988, 9(1): 22-31. [RU Ke. The development of Superimposed Basin on the Northern margin

- of the South China Sea and its tectonic significance[J]. *Oil and Gas Geology*, 1988, 9(1): 22-31.]
- [35] 孙家振, 李兰斌, 杨士恭, 等. 转换-伸展盆地—莺歌海盆地的演化[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 1995, 20(3): 243-249. [SUN Jiazhen, LI Lanbin, YANG Shigong, et al. Evolution of transform-extension Yinggehai basin[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 1995, 20(3): 243-249.]
- [36] 李思田, 林畅松, 张启明, 等. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力过程及10Ma以来的构造事件[J]. *科学通报*, 1998, 43(8): 797-810.
- [37] 郭令智, 钟志洪, 王良书, 等. 莺歌海盆地周边区域构造演化[J]. *高校地质学报*, 2001, 7(1): 1-12. [GUO Lingzhi, ZHONG Zhihong, WANG Liangshu, et al. Regional tectonic evolution around Yinggehai basin of South China Sea[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2001, 7(1): 1-12.]
- [38] Sun Z, Zhou D, Zhong Z H, et al. Experimental evidence for the dynamics of the formation of the Yinggehai basin, NW South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2003, 372(1-2): 41-58.
- [39] 钟志洪, 王良书, 夏斌, 等. 莺歌海盆地成因及其大地构造意义[J]. *地质学报*, 2004, 78(3): 302-309. [ZHONG Zhihong, WANG Liangshu, XIA Bin, et al. The dynamics of Yinggehai basin formation and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(3): 302-309.]
- [40] 陆克政, 朱筱敏, 漆家福, 等. 含油气盆地分析[M]. 北京: 石油大学出版社, 2001. [LU Kezheng, ZHU Xiaomin, QI Jiafu, et al. *Analysis of Petroliferous Basins*[M]. Beijing: China University of Petroleum Press, 2001.]
- [41] McKenzie D P. Some remarks on the development of sedimentary basins[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 40(1): 25-32.
- [42] Allen P A, Allen J R. *Basin Analysis Principles and Applications*[M]. London: Blackwell Scientific Press, 1990.
- [43] Watts A B, Ryan W B F. Flexure of the lithosphere and continental margin basins[J]. *Tectonophysics*, 1976, 36(1-3): 25-44.
- [44] Steckler M S, Watts A B. Subsidence of the Atlantic-type continental margin off New York[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 41(1): 1-13.
- [45] 林畅松, 张燕梅. 拉伸盆地模拟理论基础与新进展[J]. *地学前缘*, 1995, 2(3-4): 79-88. [LIN Changsong, ZHANG Yanmei. Basin formation and filling simulation: a case study on extensional basins[J]. *Earth Science Frontiers*, 1995, 2(3-4): 79-88.]
- [46] 于兴河, 梁金强, 方竞男, 等. 珠江口盆地深水区晚中新世以来构造沉降与似海底反射(BSR)分布的关系[J]. *古地理学报*, 2012, 14(6): 787-800. [YU Xinghe, LIANG Jinqiang, FANG Jingnan, et al. Tectonic subsidence characteristics and its relationship to BSR distribution in deep water area of Pearl River Mouth Basin since the Late Miocene[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(6): 787-800.]
- [47] 刘护军. 渭河盆地的形成演化与东秦岭的隆升[D]. 西安: 西北大学博士学位论文, 2014. [LIU Hujun. Formation and evolution of the Weihe River basin and uplift of the Eastern Qinling Mountains[D]. Xi'an: Doctor Dissertation of Northwest University, 2004.]
- [48] 吴能友, 曾维军, 宋海斌, 等. 南海区域构造沉降特征[J]. *海洋地质与第四纪*, 2003, 23(1): 56-65. [WU Nengyou, ZENG Weijun, SONG Haibin, et al. Tectonic subsidence of the south china sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(1): 56-65.]
- [49] Biddle K T, Cristie-Blick N. *Strike-slip deformation, basin formation, and Sedimentation: based on a symposium*[M]. Tulsa, Okla, USA: The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1985: 375-386.
- [50] 刘志飞, 王成善, 伊海生, 等. 可可西里盆地新生代沉积演化历史重建[J]. *地质学报*, 2001, 75(2): 250-258. [LIU Zhifei, WANG Chengshan, YI Haisheng, et al. Reconstruction of depositional history of the Cenozoic Hoh Xil basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(2): 250-258.]
- [51] 黄保家, 李旭深, 易平, 等. 莺歌海盆地乐东气田天然气地质特征和成藏史[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(4): 524-529. [HUANG Baojia, LI Xushen, YI Ping, et al. Geochemical behaviors and reservoiring history of natural gas in Ledong gas field in Yinggehai basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(4): 524-529.]
- [52] 李德威, 夏义平, 徐礼贵. 大陆板内盆山耦合及盆山成因——以青藏高原及周边盆地为例[J]. *地学前缘*, 2009, 16(3): 110-119. [LI Dewei, XIA Yiping, XU Ligui. Coupling and formation mechanism of continental intraplate basin and orogen-Examples from the Qinghai-Tibet Plateau and adjacent basins[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(3): 110-119.]
- [53] 张培震, 张会平, 郑文俊, 等. 东亚大陆新生代构造演化[J]. *地震地质*, 2014, 36(3): 574-585. [ZHANG Peizhen, ZHANG Huijun, ZHENG Wenjun, et al. Cenozoic Tectonic evolution of continental eastern Asia[J]. *Seismology and Geology*, 2014, 36(3): 574-585.]
- [54] 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. *中国科学D辑*, 1996, 26(4): 289-295. [ZHONG Dalai, DING Lin. Rising process of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and its mechanism[J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 39(4): 369-379.]
- [55] 张培震, 郑德文, 尹功名, 等. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(1): 5-13. [ZHANG Peizhen, ZHENG Dewen, YIN Gongming, et al. Discussion on late Cenozoic growth and rise of northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Science*, 2006, 26(1): 5-13.]
- [56] 刘建辉, 张培震, 郑德文, 等. 秦岭太白山新生代隆升冷却历史的磷灰石裂变径迹分析[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(1): 2405-2414. [LIU Jianhui, ZHANG Peizhen, ZHENG Dewen, et al. The cooling history of Cenozoic exhumation and uplift of the Taibai Mountain, Qinling, China: evidence from the apatite fission track (AFT) analysis[J]. *Chinese*

- Journal of Geophysics, 2010, 53(1): 2405-2414.]
- [57] 任战利, 崔军平, 李进步, 等. 鄂尔多斯盆地渭北隆起奥陶系构造-热演化史恢复 [J]. 地质学报, 2014, 88(11): 2044-2056. [REN Zhanli, CUI Junping, LI Jinbu, et al. Tectonic-Thermal history reconstruction of Ordovician in the Weibei Uplift of Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(11): 2044-2056.]
- [58] Cai Z R, Xia B, Lv B F, et al. Initial rifting process and dynamics mechanism of Huaguang Sag: evidence from a numerical modeling method[J]. Journal of Earth Science, 2015, 26(3): 399-406.
- [59] Northrup C J, Royden L H, Burchfiel B C. Motion of the Pacific plate relation to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia[J]. Geology, 1995, 23: 719-722.
- [60] Lee T Y, Lawver L A. Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia[J]. Tectonophysics, 1995, 251(1-4): 85-138.
- [61] 刘光鼎. 中国海区及邻域地质地球物理特征[M]. 北京: 科学出版社, 1992. [LIU Guangding. Geologic-geophysic Features of China Seas and Adjacent Regions[M]. Beijing: Science Press, 1992.]
- [62] Li C F, Xu X, Lin J, et al. Ages and magnetic structures of the south china sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP expedition 349 [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2014, 15(12): 4958-4983.
- [63] Li C F, Li J B, Ding W W, et al. Seismic stratigraphy of the central south china sea basin and implications for neotectonics [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(3): 1377-1399.

GENETIC MECHANISM OF THE YINGGEHAI BASIN, NORTHERN SOUTH CHINA SEA: A COMPARATIVE STUDY TO THE WEIHE BASIN

YANG Peng¹, XIA Bin^{1,2}, CAI Zhouong¹, WAN Zhifeng¹, HUANG Qiangtai¹, ZHANG Yong¹

- (1. Guangdong Key Laboratory of Offshore Oil Exploration and Development, Offshore Oil Exploration and Development Center, School of Marine Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;
2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry Chinese Academy Of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: The Yinggehai Basin is a Cenozoic depositional basin located on the Northern Continental Margin of the South China Sea, a unique and important tectonic position at the convergent hinge among the Eurasian, Pacific and Indo-Australian plates. The complicated geotectonics of the basin has made the genetic mechanism of the basin a hotspot. In this paper, the Weihe Basin, a basin with similar tectonic subsidence and sedimentary evolution history and genetic mechanism, is selected for purpose of comparative study. The Yinggehai Basin and the Weihe Basin are on the Southern and Northern margins of the South China plate respectively. Both of them are located at a juncture of plates as typical strike slip basins with long terms of rapid subsidence and sedimentation histories. Taking the Weihe Basin as an example, a comparative study is carried out on the history of tectonic subsidence and sedimentation, upon the consideration of specific tectonic location of the Yinggehai Basin and the tectonic background of the expanding South China Sea. The comparison reveals that the formation and evolution of the Yinggehai Basin is closely related with the collision between the India plate and the Qinghai-Xizang plate, escape and the self rotation of Indo-China block, eastward extrusion of the Southern China block and the subduction of the Pacific plate. Affected by the multi-stage plate tectonic activities, the basin has experienced several evolutionary stages. Since Cenozoic, it has suffered a sinistral strike stage, a slip stretch-thermal subsidence stage and an extral strike slip extension stage. In addition, high temperature and pressure geological records, mud diapir and other special geological phenomena are observed in the Yinggehai Basin under the control of thermal subsidence related to the expansion of the South China Sea since Oligocene(33~15 Ma).

Key words: tectonic subsidence; sedimentary evolution; genetic mechanism; basin analysis; plate tectonics; Weihe Basin; Yinggehai Basin; South China Sea