

文章编号: 0253-9985(2006)03-0305-11

中国南方印支—燕山期复合盆山体系与盆地原型改造

吴冲龙^{1,2}, 杜远生¹, 梅廉夫¹, 周江羽¹, 孔春芳¹

(1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074 2. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在中国南方, 印支期—燕山期发育了多个前陆型盆山体系。这些盆山体系互相影响、互相干扰、互相叠加, 成为“复合盆山体系”。文中对上扬子复合盆山体系进行了典型解剖, 揭示了复合盆山体系的成因是古特提斯多岛洋的闭合和多个块体的汇聚、碰撞和造山作用。研究表明, 龙门山、大巴山、江南隆起构造带及其前陆盆地, 在印支期以来的长期盆山耦合演化和复合演化过程中, 除了两两交叉形成复合盆山体系外, 还最终形成了“三山一盆”的巨型复合盆山体系——龙门山—大巴山—江南隆起复合盆山体系, 简称上扬子复合盆山体系。在印支—早燕山期后, 上扬子复合盆山体系与南方地区其他复合盆山体系一起, 整体进入改造阶段, 最终成为今天如此复杂的盆山结构与形貌。

关键词: 前陆盆地; 盆山体系; 盆山耦合; 古特提斯; 多岛洋; 中国南方

中图分类号: TE111.1 文献标识码: A

Composite basin-and-range system and reformation of basin prototype in Indosinian-Yanshanian in South China

Wu Chonglong^{1,2}, Du Yuansheng¹, Mei Lianfu¹, Zhou Jiangyu¹, Kong Chunfang¹

(1. China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074 2. State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, Wuhan, Hubei 430074)

Abstract Several basin-and-range systems of foreland-type were developed in Indosinian-Yanshanian in South China and they became “a composite basin-and-range system” through mutual influence, interference and superimposition. Based on detailed analysis of the Upper Yangtze composite basin-and-range system, it is believed that the composite basin-and-range system has been formed through the closing of Paleotethys archipelagic ocean, the convergence and collision of multiple blocks and orogeny. The researches reveal that in the long-term evolution of basin-and-range coupling and composite evolution since Indosinian, Longmen Mountain, Daba Mountain, Jiangnan uplifted tectonic zone and their foreland basins have not only led to the formation of several composite basin-and-range systems but have also led to the final formation of the huge composite basin-and-range system with “three mountains and one basin”, i.e. Longmen-Daba-Jiangnan uplift composite basin-and-range system, also called the Upper Yangtze composite basin-and-range system for short. After Indosinian—Early Yanshanian, the Upper Yangtze composite basin-and-range system, together with the other composite basin-and-range systems in South China, have entirely been reformed and finally resulted in the present complicated basin-and-range structures and appearances.

Key words foreland basin, basin-and-range system, basin-and-ranges coupling, Paleotethys archipelagic ocean, South China

印支—早、中燕山期是中国南方由以建造为主

的阶段进入以改造为主的阶段的转折点和过渡时期。在这个过渡期, 中国南方出现了“到处在碰撞, 到处在造山, 到处在成盆, 到处在推覆”的奇特构造景观, 各盆山体系之间互相影响、互相干扰、互相叠加, 形成“复合盆山体系”, 对油气成藏、保

收稿日期: 2006-05-17

第一作者简介: 吴冲龙 (1945—), 男, 教授、博士生导师, 盆地构造与油气地质
基金项目: 国家“十五”重点科技攻关项目 (2004BA616A-06-01)

存条件产生了严重的影响。前陆冲断带油气资源具有较大潜力^[1],但中国南方印支—燕山期前陆盆地原型的变形特征和改造历史十分复杂。从复合盆山体系的角度出发,揭示前陆盆地形成演化与相邻造山带的联系及其耦合演化过程和动力学机制,可能是解开中国南方各类前陆盆地原型的复杂变形之谜的一把钥匙。

1 “复合盆山体系”和“盆地原型改造”的概念

所谓“复合盆山体系”是指两个或两个以上单一盆山体系叠合或联合而成的复杂盆山体系。对于前陆型盆山体系而言,单一的盆山体系由一山一盆或一山两盆(包括前陆盆地和后陆盆地)组合而成,其组成、结构较为简单;而复合盆山体系的组成、结构较为复杂,可以有多种类型。有两山一盆的,如江汉盆地与秦岭—大别山隆起带和江南隆起带;下扬子盆地与苏鲁隆起带和江南隆起带;有三山两盆的,如楚雄盆地、思茅盆地与昌宁—孟连、哀牢山和川滇隆起,南盘江盆地、十万大山盆地与越北隆起、云开隆起和江南隆起;有三山一盆的,如四川盆地与龙门山、大巴山和雪峰山。出现这些复合盆山体系的原因,显然与印支期中国南方特殊的多个块体汇聚、碰撞和造山背景有关,进而与古特提斯多岛洋^[2]的闭合作用有关。

所谓“盆地原型的改造”,是指由后期构造运动和原型叠加所引起的沉积盖层的变形和剥蚀、构造格架的割裂和复合、盆地结构的离散和破损以及流体系统的调整和改造。这 4 种改造类型之间是相互联系、相互依存的。其中,沉积盖层的变形和剥蚀包括褶皱、断裂、推覆、滑覆、抬升剥蚀和不整合面的形成;构造格架的割裂和复合包括拆分、解体、叠加、反转、复杂化以及整体形态的扭曲和错移;盆地结构的离散和缺损包括碎裂、离散和局部缺失乃至全部损毁;而流体系统的调整和改造则包括地下水、油、气、深层地质流体及其混合系统的性质、组成、结构和运动方式的改变、重组乃至破坏。研究区盆地原型的改造除了遵从前陆盆地演化的一般规律^[3~5]外,也有许多自身的特点。

2 印支运动前的中国南方海相盆地原型

中国南方经历了元古宙以来的长期复杂演

化,形成了包括南华洋盆地、南秦岭洋盆地、昌宁—孟连洋盆地、哀牢山洋盆地、甘孜—理塘洋盆地、扬子克拉通盆地、华夏克拉通盆地以及叠加在两大板块周缘的各期前陆盆地和裂陷盆地^[6]。在海西运动中,随着金沙江洋、甘孜—理塘洋、勉略洋和南华洋(海槽)的相继开裂和连通,在中国南方(现位)形成了由扬子板块、华夏板块、闽东陆块、秦岭微板块、义敦微板块、昌都—思茅微板块和保山微板块及其间的小洋盆组成的古特提斯多岛洋格局^[2]。到了印支运动早期,古特提斯多岛洋开始闭合,南方地区进入陆内构造演化阶段,形成了古陆和隆起、板块和微板块、残余洋盆、海湾、被动大陆边缘盆地、类前陆盆地、类后陆盆地、内陆断陷湖盆等多种单元并存的古地理格局。

2.1 扬子北缘的前陆盆地和大陆边缘盆地原型

沿南大巴山—南秦岭—大别山以南,在古生代大陆边缘上形成了以川东北坳陷、江汉盆地、下扬子东部盆地和苏北盆地为代表的北前陆盆地带。它们都属于被动大陆边缘稳定沉积基础上发育起来的类周缘前陆盆地。秦岭微板块北缘石炭纪—早三叠世的裂陷槽,以稳定的浅水碳酸盐岩沉积为主。随着扬子板块、秦岭微板块与华北板块在三叠纪中、晚期的最终碰撞,形成早、中三叠世北秦岭造山带和中秦岭的残余盆地或同造山盆地的复理石沉积。在中、下扬子区北缘前陆盆地,早期的沉积基本继承了中三叠世残留盆地格局。其中,上扬子的米仓山—大巴山类前陆盆地形成于中印支期,而强化于燕山期^[7];中扬子地区的前陆盆地沉积响应,仅保留在汉水断裂以南的当阳—沉湖复向斜一带。在中扬子区的中、上三叠统之间,大多呈平行不整合接触关系,表明该时期中扬子区尚未造山;下扬子区的中、上三叠统之间多呈角度不整合和平行不整合接触关系,表明下扬子地区的源区从晚三叠世开始已经强烈隆升并遭受剥蚀。

2.2 扬子西缘的前陆盆地和大陆边缘盆地原型

由于金沙江洋、甘孜—理塘洋盆的闭合以及各地块的拼贴,使松潘—甘孜被动大陆边缘盆地发生褶皱冲断,进而在扬子西缘和西南缘形成了川西、楚雄、思茅、十万大山、南盘江—右江等前陆盆地。它们大多是在弧后浊积盆地基础上发育起来的,属于弧后前陆盆地。由于拼贴地块的规模较小,

前陆盆地特征不很显著,也有人称之为类前陆盆地。

早二叠世,扬子克拉通西缘主要沉积浅海碳酸盐岩。这些海相碳酸盐岩是研究区重要的烃源岩。晚二叠世—中三叠世,川滇古陆隆升,古陆以西的滇西地区为滨海碎屑岩和碳酸盐岩沉积,川西、川北可能与秦岭、川西海连为一体,沉积物以陆棚浅海相为主形成于扬子克拉通西缘的同造山前陆盆地主要沉积陆源碎屑沉积物。

石炭纪—三叠世早期,松潘—甘孜地块上均沉积浅海碳酸盐岩。而中三叠世晚期—晚三叠世中期,随着秦岭造山带的向南仰冲,该区形成了同造山坳陷盆地,沉积了近万米的复理石。至晚三叠世晚期,该区东缘向扬子克拉通仰冲,形成龙门山前陆盆地。

义敦小型克拉通盆地在二叠纪以浅海碎屑岩及碳酸盐岩沉积为主,内夹火山岩沉积。泥盆纪,昌都—思茅地区主要沉积浅海砂泥岩及灰岩,在古陆边缘发育陆相—滨岸碎屑沉积;在晚二叠世早期,以浅海砂泥岩为主,内夹煤线或薄煤层及灰岩夹层;晚二叠世晚期,主要沉积浅海碎屑岩和灰岩,昌都一带见有煤线;晚三叠世,随着西部的澜沧江—昌宁—孟连洋的闭合,昌都—思茅大部分地区又出现山前坳陷的粗碎屑沉积。保山微板块总体上也处于稳定的小型克拉通盆地环境。从晚古生代—中三叠世,除腾冲地区因处于古陆状态而在边缘有少量陆源碎屑沉积外,大部分地区沉积浅海碳酸盐岩;晚三叠世早期,腾冲古陆隆起加剧,小型克拉通盆地逐步萎缩,沉积了碎屑岩、灰岩及火山岩;至晚三叠世晚期,转化为山前坳陷,沉积了海相磨拉石。

2.3 扬子板块东南部的南华裂陷海槽和西南部的陆缘盆地

在晚古生代—三叠纪,扬子板块东南缘经历了再次拉伸裂陷—闭合的过程,形成了粤闽赣湘晚三叠世—早侏罗世裂陷海槽。在泥盆纪,滇黔桂湘地区首先形成走向 NE 和 NW 的一系列裂陷槽。从构造方向及构造背景看,走向 NW 的裂陷槽与金沙江—哀牢山—马江洋东段的构造线一致,而走向 NE 的裂陷槽与钦防海槽一致。到了晚泥盆世晚期—石炭纪,上述海槽逐渐被充填变浅。二叠纪—早三叠世,裂陷作用加剧,在滇黔桂地区

NW 向裂陷槽中发育了大规模的中基性火山岩,包括类似于大洋玄武岩的枕状玄武岩。在浙赣湘粤地区的绍兴、江山、鹰潭、罗定、云浮一带,形成 NE 向裂陷海槽。由于华夏板块与扬子板块的再次碰撞拼接,该裂陷海槽于三叠纪后期逐渐萎缩闭合,在滇黔桂一带形成同造山的前陆盆地,而在浙赣湘粤一带形成残余断陷盆地。

在中、晚三叠纪,扬子板块西南部的三江地区各块体重新拼贴到扬子板块上,大部地区结束了海相沉积;碰撞造山带附近形成了大型前陆盆地,并产生大型挤压冲断褶皱带及大规模岩浆活动,早期断层均发生反转和冲断。这次运动——印支运动还使江南隆起带以南的华南地区上古生界普遍褶皱及冲断,江南隆起带及其以北的华南地区发生隆升与剥蚀。

3 中国南方复合盆山体系示例

在中国南方的诸多复合盆山体系中,由龙门山、大巴山、江南隆起和四川盆地组成的上扬子复合盆山体系规模最大,最为典型,也最具油气勘探价值。下面将以此为例进行剖析。

3.1 龙门山—大巴山复合盆山体系

龙门山东北端与大巴山西端相连接。二者先后卷入向东和向南的造山和逆冲推覆作用中去,并且有相当长的一段时间同时作用,联合控制了一个复合型的盆山体系——龙门山—川西—大巴山—川东北盆山体系的形成和演化。为了叙述方便,我们将这个复合盆山体系简称为龙门山—大巴山复合盆山体系,而将它们各自的盆山体系称为龙门山盆山体系和大巴山盆山体系,将它们各自的前陆盆地称为龙门山(类周缘)前陆盆地和大巴山(类周缘)前陆盆地。

3.1.1 龙门山—大巴山复合盆山体系的形成

龙门山前陆坳陷的形成始于晚印支期。在晚三叠世初的卡尼期末,义敦地块与扬子板块拼合;从中三叠世晚期开始至诺利阶,甘孜理塘洋盆以东迅速挠曲沉降,形成了巨厚的被动大陆边缘增生楔。晚三叠世中、晚期,察雅芒康地块再次向东增生,形成新龙稻城带增生楔。金沙江洋盆逐渐被填满,沉积了深水盆地体系的浊积岩和

浅海陆棚体系的碳酸盐岩。到晚三叠世末(瑞替阶),甘孜-理塘洋的闭合使松潘-甘孜地块普遍发生走向 NW 的褶皱变形,同时又使四川盆地西部发生挠曲沉降,海水向东侵进,直逼威远、潼南、通江一带。到了小塘子组沉积期末,可能是冈底斯地块的碰撞挤出所致,松潘-甘孜块体的主压应力方向由原来的 NE-SW 向变为 NW-SE 向,前陆挠曲作用不断增强,导致 NE 走向的前陆盆地,即川西坳陷的形成(图 1)。该前陆盆地现今为白垩系和第三系所覆盖,北侧位于广元、旺苍之间,南缘处在乐山、雅安之间,沉积了由海相转陆相的须家河组(T_{3x})。在须家河组三段沉积末期(诺利末期),松潘-甘孜块体 NW-SE 向挤压进一步强化,在与扬子板块拼合处发生强烈逆冲作用,形成了龙门山逆冲推覆构造带,在川西前陆盆地内的 T_{3x}^3 之上留下了不整合面。导致这次变形作用的构造运动,也称安县运动^[8]。

大巴山(类周缘)前陆盆地形成于中印支期而

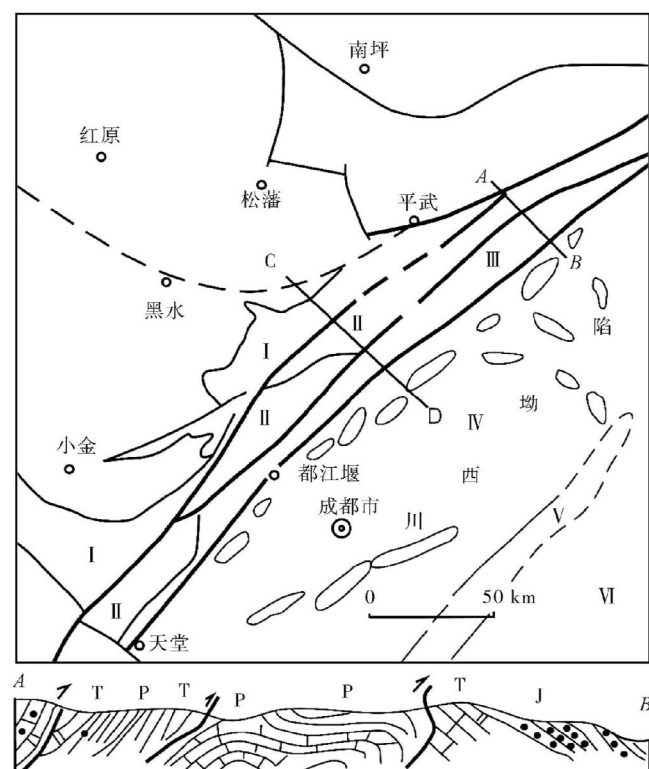


图 1 龙门山区域构造示意图^[9]

Fig. 1 Sketch map showing regional tectonics in Longmenshan area

- I. 茂汶韧性剪切带; II. 龙门山叠瓦冲断带;
III. 龙门山逆掩推覆构造带; VI. 川西坳陷带;
V. 龙泉山前陆隆起带; IV. 川中隆后坳陷带

强化于燕山期。在早三叠世时,南秦岭洋继续扩展,扬子地块的北缘斜坡带以及相关的坳拉槽进一步沉降,出现典型的被动大陆边缘沉积环境。到中三叠世,华北板块与扬子板块最终拼合,南秦岭洋逐步封闭。在雷口坡组(T_2l)沉积期,米仓山-大巴山系尚处于低幅稳定隆升状态。在雷口坡组沉积期末,米仓山-大巴山造山作用增强,在隆起顶部的雷口坡组和须家河组之间形成了低角度不整合面和白云岩溶蚀角砾岩层。至雷口坡组沉积期末,大巴山前陆地区还是连接米仓山-大巴山隆起与川东向斜构造带的一个斜坡带。在须家河晚期(T_{3x}^{4-6}),米仓山-大巴山进入强烈构造挤压和均衡隆升阶段^[10],川东北开始进入前渊沉降阶段,沉积厚度迅速加大,形成了大巴山(类周缘)前陆盆地。该前陆盆地东起城口、开县,西达广元、剑阁、盐亭,北至南江、万源,南抵达川、营山等地。川中坳陷的北缘隆起可视为其前陆隆起,而川中坳陷可视作其隆后坳陷。该前陆盆地以须家河早、中期海陆交互相含煤岩系为沉积基底,依次沉积了须家河组上部(T_{3x}^{4-6})和中-下侏罗统下部的陆相碎屑岩系。

龙门山和米仓山-大巴山前陆盆地的形成和改造,都受到甘孜-理塘造山带和秦岭造山带的双向控制^[11~15]。有证据表明,这两个造山带的前展式推进、挤压和褶皱冲断作用一直延续到喜马拉雅期。由于这两个盆山体系的形成有先后,便出现了既有联合又有叠加关系——须家河组上部(T_{3x}^{4-6})、中-下侏罗统和第四系为叠加改造关系,而晚侏罗世—早白垩世、晚白垩世—早第三纪沉积为联合作用关系。

3.1.2 龙门山-大巴山复合盆山体系的组成与变形特征

在这个复合盆山体系中,震旦系以上海相地层连同中生界陆相地层都被卷入,形成了复杂的多层次盆山耦合变形。龙门山盆山体系由 6 个构造单元组成^[9]:茂汶韧性剪切带、龙门山叠瓦冲断带、龙门山逆掩推覆带、川西坳陷带、龙泉山前陆隆起带和川中隆后坳陷带。其中,龙门山逆掩推覆带可以分为前山推覆带和山前隐蔽带两个亚带。前者位于北川映秀断裂之东至彭灌断裂之间,发育一系列逆掩断裂和由推覆或滑覆体构成的飞来峰群,表现出盖层滑脱型的薄皮构造特征;后者

位于彭灌断裂之东, 发育一系列由三叠系和侏罗系组成的褶皱构造, 如中坝、磁峰场、平洛坝等构造。龙门山(类周缘)前陆盆地大致以江油为界, 可分为南北两段。南段主要受甘孜—理塘造山带的控制, 形成于晚三叠世, 发育须家河组四段冲积扇砾岩和须家河组四段至六段楔状磨拉石建造; 北段主要受米仓山—大巴山逆冲推覆作用的控制, 形成于早侏罗世(晚印支期), 发育下侏罗统白田坝组冲积扇砾岩。在龙门山南部的灌县青城山一带, 白田坝组与须家河组四段成假整合接触, 更南至芦山大川一带, 白田坝组与须家河组呈整合接触, 白田坝组砾岩也明显变薄, 说明晚印支期的米仓山—大巴山—秦岭造山作用对龙门山南段没有明显的影响。晚侏罗统莲花山组和下白垩统天马山组的冲积扇砾岩在广元至宝兴普遍分布, 表明龙门山前陆盆地的南、北段从中燕山期开始就受到统一构造体制的控制。根据沉积厚度分析, 米仓山—大巴山在中燕山期的推挤—造盆作用比龙门山更为强烈。两个逆冲推覆带的联合作用, 在龙门山前陆盆地中坝—九龙山、孝泉—丰谷、新津—邛崃的侏罗—白垩系盖层中, 形成了 3 个等间距排列的低幅度隆起和一系列弧形小型背斜构造(图 1)。

米仓山—大巴山盆山体系由米仓山—大巴山主造山隆起带、米仓山前缘构造带、大巴山(类周缘)前缘构造带、川东北残留前陆盆地和川中前陆隆起等几个构造单元组成(图 2)。

米仓山前缘构造带(I, 图 2)包括广元—旺苍东西向弧形构造带, 东连大巴山前缘构造带, 西接龙门山北段前缘构造带, 南邻通南巴构造带。它由一系列向南逆冲推覆的叠瓦状断片组成。大巴山前缘构造带(II, 图 2)即南大巴山褶皱冲断带, 也称“南大巴山弧形断褶带”, 是秦岭褶皱冲断带的组成部分。这两个构造带所卷入的地层均为 T_3 — K , 构造变形比北侧主造山带明显减弱, 断裂密度也明显降低。在侏罗系和三叠系之间存在滑脱面, 主要变形样式为台阶状逆断层及相关褶皱, 构成台阶式断坡、断坪和叠瓦状逆冲推覆—滑覆构造。褶皱中常发育分别倾向 NE 和 SW 的逆冲断层, 构成对冲式或背冲式构造。次级褶皱的变形样式明显与岩性的能干性有关。大部分背斜两翼地层的产状北东缓南西陡, 地层倾角 $30^\circ \sim 80^\circ$, 轴面向北东倾斜。

多盆山体系的多期次复合作用, 使得大巴山(类周缘)前陆盆地区(III 图 2)的变形较强烈, 形成了垂向上多个构造层叠覆、而平面上 NE 向与 NW 向褶皱—断裂叠加的格局。在靠近大巴山前缘构造带的地方, 逆冲推覆现象较为强烈; 向盆的方向则逐步弱化。在大巴山前缘构造带和米仓山前缘构造带交汇处南侧是通江向斜, 总体上是一个宽缓的短轴向斜, 反映了两个前缘构造带过渡区的应力场特征。在通江向斜轴部的东侧, 上形变层中伴生有两个同走向的宽缓背斜和向斜, 同时还叠加了多个走向 NW 的短轴褶皱, 反映了不同方向构造作用的影响。

3.1.3 龙门山—大巴山复合盆山体系对海相地层的改造

在主造山带及其前缘, 这种改造表现为全部海相地层被卷入逆冲推覆—滑覆作用中, 甚至解体成叠瓦状岩片; 在前陆区域, 则表现为坳陷沉降并被前陆盆地的沉积物掩埋, 又随造山带前展式逆冲推覆作用增强而逐步变形, 甚至被推覆体所覆盖。由于变形期次和强度不同, 以震旦系和志留系页岩、下三叠统飞仙关组薄层泥灰岩、上三叠统须家河组含煤岩系等几个滑脱层为界, 在垂向上形成了 3 个有差异的变形层: 上形变层(T_2 — J)、中形变层(ϵ — T_1)和下形变层(Z — Pt)。

在龙门山(类周缘)前陆盆地区, 发生于侏罗系—白垩系沉积盖层中的各种构造变形, 对作为其直接基底的上、下组合海相地层的影响比较微弱^[12]。

在米仓山—大巴山(类周缘)前陆盆地区, 沉积盖层的变形较强烈, 上、下组合海相地层均已卷入。其北部的构造主体是 NE 向的通南巴背斜和通江向斜。在通南巴背斜所在处, 震旦系—白垩系均卷入变形, 从 SW 到 NE, 构造高点由下而上逐步偏离, 褶皱两翼则由对称到向 SE 歪斜; 上形变层的断层由少到多、由简单到出现背冲和对冲式构造, 而中—下形变层的断层则由多到少。这表明从 SW 到 NE、由下而上, 龙门山构造带的影响减弱, 而米仓山—大巴山构造带的影响增强了。通江向斜总体上比通南巴背斜更为宽缓, 但在靠近大巴山前缘处, 逆冲推覆现象逐步强化。从大巴山前缘构造带向盆地方向, 构造变形的分带性表现在: ①背斜核部出露地层由老变

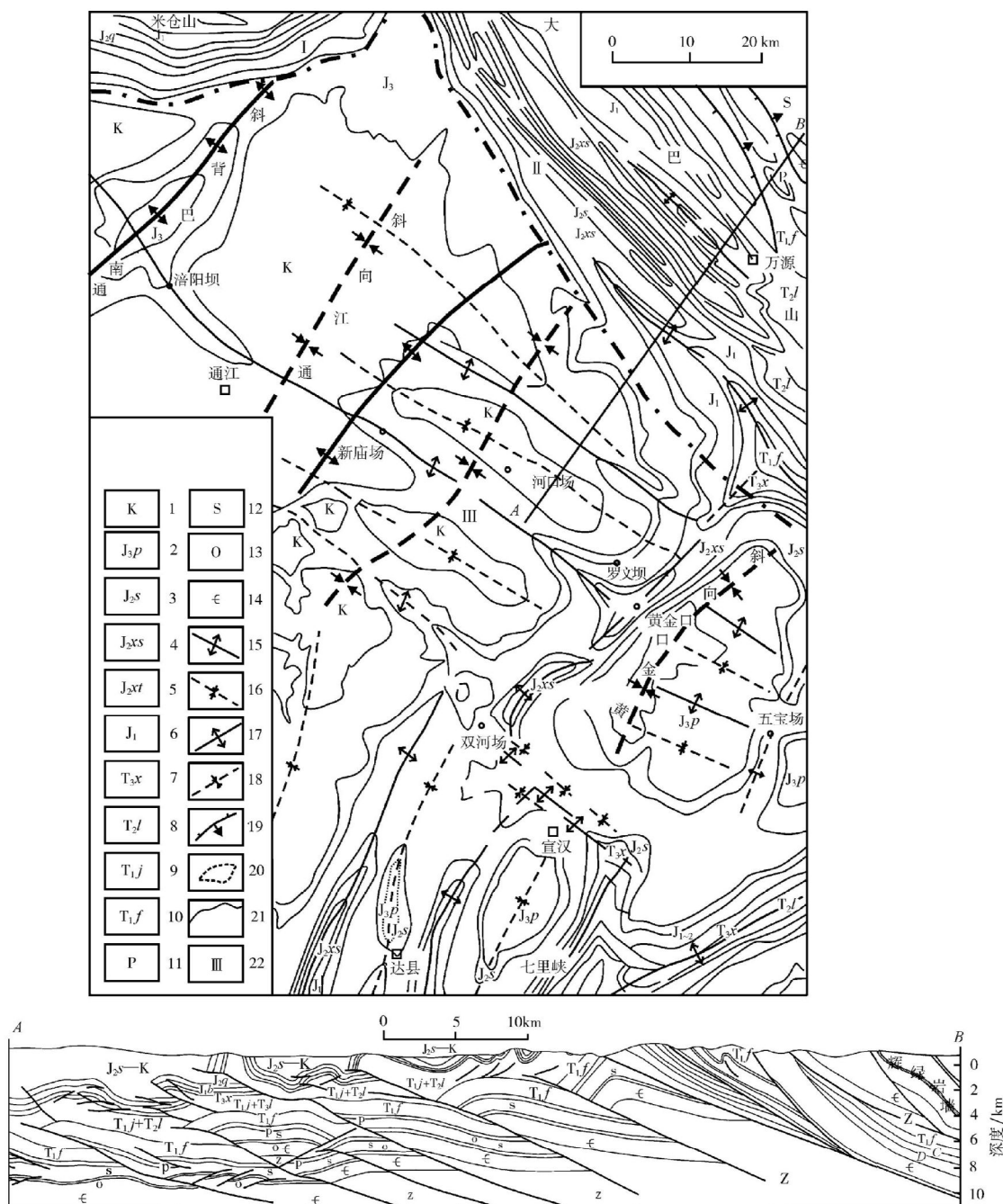


图 2 川东北地区构造纲要与构造单元划分

Fig. 2 Tectonic outline and tectonic units in northeastern Sichuan basin

1. 白垩系; 2 上侏罗统; 3 上沙溪庙组; 4 下沙溪庙组; 5 新田沟组; 6 下侏罗统; 7. 须家河组; 8 雷口坡组; 9 嘉陵江组;
10 飞仙关组; 11. 二叠系; 12 志留系; 13 奥陶系; 14 寒武系; 15. NW 向背斜轴; 16. NW 向向斜轴;
17. NE 向背斜轴; 18. NE 向向斜轴; 19 断层; 20 隆起; 21. 地质界线; 22 构造单元编号
I. 米仓山前缘构造带; II. 大巴山前缘构造带; III. 大巴山前陆盆地

新, 在构造带北缘的镇巴-鸡鸣寺一带, 背斜核部为寒武系、震旦系, 向 SW 至构造带边缘逐步变为三叠系; ②褶皱变形强度由强变弱, 由背向斜紧密转变为背斜紧密、向斜开阔的隔挡式; ③变形样式由叠瓦式逆冲断层与简单褶皱, 转变为轴部和翼部次级褶皱发育的复式褶皱 (图 2)。

3.2 大巴山-江南隆起复合盆山体系

米仓山-大巴山盆山体系与江南隆起盆山体系 (即雪峰-武陵盆山体系) 遥相呼应, 构成一个大规模的复合盆山体系。其典型表现是在两个前陆盆地之间, 联合形成了一个开口向西的喇叭形褶皱冲断体系。该喇叭形褶皱冲断体系向东

平行延伸直至黄陵背斜带。

3.2.1 江南隆起盆山体系的结构与组成

前人早已注意到该区构造的多期复合特征^[7]。本文结合 ESR(电子自旋共振)年龄分析确认, 该盆山体系经历了 4 个发展阶段: ①第一挤压造山阶段 ($> 180 \text{ Ma}$ 印支期); ②第二挤压造山阶段 ($130 \sim 160 \text{ Ma}$ 燕山早期); ③伸展裂陷阶段 ($85 \sim 120 \text{ Ma}$ 燕山晚期); ④反转挤压逆冲阶段 ($25 \sim 65 \text{ Ma}$ 喜马拉雅期)。显然, 江南隆起盆山体系也是由两个盆山体系叠加而成的复合盆山体系。

1) 第一挤压造山阶段的盆山体系

该体系形成于 180 Ma 之前, 包括湘赣周缘前陆盆地、江南隆起带、湘鄂西—黔渝东类后陆盆地、川东类后陆隆起和川中坳陷。江南隆起带是一个不对称的两侧逆冲推覆陆内造山带, 元古界变质基底遭受强烈的流变和韧性剪切作用并大面积露出地表, SE 缘形成反冲—对冲构造带并对湘赣周缘前陆盆地造成影响。湘鄂西—黔渝东类后陆盆地发育于江南隆起 NW 侧前缘, 介于江南断裂与齐岳山—南川—遵义—都匀一线之间, 走向由 NEE—NE—NNE, 呈弧形展布。这里从早三叠世开始由碳酸盐岩陆架环境过渡到碳酸盐岩台地, 进而转变为残留海盆地, 中三叠世转变成残留山间盆地, 晚三叠世转变成类后陆盆地, 沉积了厚达数千米的浅水湖泊—沼泽体系, 随后也被卷入向 NW 的推覆与褶皱变形中, 成为川—渝—鄂—湘—黔推覆—滑覆构造带的组成部分。

川东类后陆隆起由北侧的开江古隆起和南侧的泸州古隆起组成。雷口坡组 (T_2l) 的等厚线反映出, 早印支期的开江古隆起高点在沙罐坪一带, 泸州古隆起高点在泸州一带。在近 $2.2 \times$

10^4 km^2 的隆起范围内, 雷口坡组全部缺失, 地层剥蚀到下三叠统嘉陵江组三段, 最大剥蚀厚度超过千米。在印支晚期, 泸州古隆起的须家河组厚度变化与雷口坡组相似, 等值线走向也是 NE 向, 由 SE 向 NW 地层厚度逐渐增大, 但开江古隆起的表现开始减弱。从动力学机制上分析, 这些古隆起的成因可能与江南隆起第一挤压造山阶段的 NW—SE 向挤压作用有关, 因此推测为该盆山体系的类后陆隆起。在川东隆起西侧的川中坳陷, 是该期盆山体系的类后陆隆后坳陷。

2) 第二挤压造山阶段的盆山体系

该体系主要成分有衡阳 (类周缘) 前陆盆地、雪峰山中部褶皱冲断带、雪峰山西缘逆冲带、沅江—麻阳类后陆盆地和武陵山类后陆隆起带。

中部褶皱冲断带位于雪峰山主体部位, 主要发育基底卷入式的厚皮式背冲、对冲构造, 具有向 NW 和 SE 双向逆冲推覆的特征, 但向 NW 逆冲远比向 SE 逆冲更为强烈。雪峰山西缘逆冲带位于溆浦—石宝断裂和沅江—麻阳盆地之间, 是高角度厚皮式逆冲推覆构造与低角度薄皮式滑脱构造的过渡带, 构造样式以叠瓦状逆冲—滑脱为主, 也常见对冲和背冲构造 (图 3)。该带上仅残留少量震旦系和寒武系, 奥陶系以上海相岩系不复存在。沅江—麻阳类后陆盆地位于溆浦四堡断裂和古丈凤凰深断裂间, 宽约 105 km , 走向 NE—NEE, 沉积了中侏罗统陆相碎屑岩系。盆地下方是江南—雪峰基底拆离逆冲推覆构造带, 由多个由 SE 向 NW 逆冲的岩片组成, 构造带变形强烈但岩浆活动较弱。在盆地中部的辰溪—怀化一带, 中侏罗统之上发育许多由上三叠—下侏罗统构成的飞来峰, 通过 ESR 年龄值分析, 证实其强烈活动发生在 $130 \sim 160 \text{ Ma}$ (燕山早期), 结束于 100 Ma (燕山晚期)。武陵山类后陆隆起带位

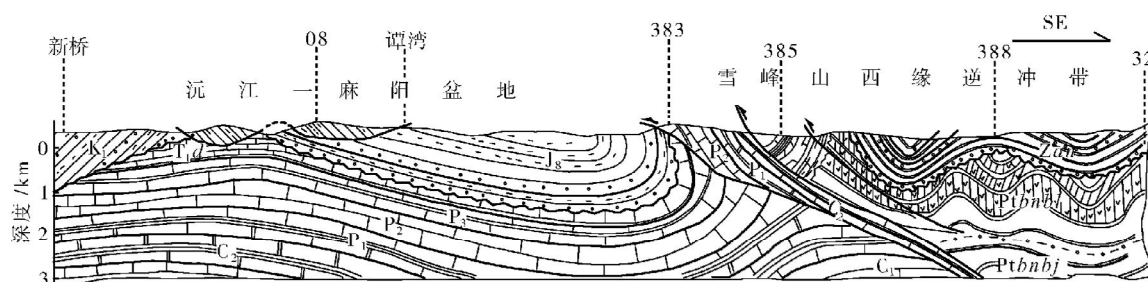


图 3 湘西沅江—麻阳盆地东缘地质构造剖面

Fig. 3 Geological tectonic profile along the eastern margin of Yuanjiang-Mayang basin in western Hunan

于沅陵-麻阳盆地西北侧,主要发育基底卷入式的叠瓦式逆冲推覆构造,断面倾向 SE,多具有先逆冲、再左行平移、然后正滑的特点。

3.2.2 江南隆起盆山体系的变形特征

两期盆山体系的复合叠加,使江南隆起带类后陆区域出现了广阔的川-渝-湘-鄂-黔推覆-滑覆构造带。已有的研究表明,仅仅用薄皮构造和厚皮构造^[16]的概念难以对此变形特征和机制作出准确的描述。根据变形特征及其与基底的关系,自 SE 向 NW 可分为 3 个变形带,即挤出式冲断-褶皱带、隔槽式褶皱带和隔挡式褶皱带。

从江南隆起经渝东-鄂西-湘西到川东,该推覆-滑覆构造连续传播距离超过 360 km,具有显著的 SE 强 NW 弱的递进变形特征,而且构造变形有显著的规律性。在江南断裂(江南隆起北缘)至宜都-龙潭坪断裂的 75 km 范围内,是基底卷入式的基底挤出式变形带,元古界变质基底与上覆海相地层一起卷入叠瓦状推覆和滑覆作用中;在宜都-龙潭坪断裂至齐岳山背斜的 150 km 范围内,是渝东-湘鄂西半基底卷入式的隔槽式(背斜宽缓、向斜窄陡)变形带;而在齐岳山背斜至华蓥山背斜的 135 km 范围内,即为川东-渝东盖层卷入式的隔挡式变形带(向斜宽缓、背斜窄陡),震旦系及其以上的海相地层均卷入分层滑脱和逆冲推覆作用中。在这 3 个变形带之间,都有一定范围的转换带或过渡带。由于其传播距离大,对四川盆地的影响主要表现为造成海相沉积盖层的分层滑脱与隔槽-隔挡式褶皱冲断。若算上川中坳陷近 200 km 的低缓背斜变形带,则该构造带的变形分带规律性更加明显。这种有规律的变形分带,应当是在统一的构造应力-应变场控制下形成的。

3.2.3 大巴山-江南隆起复合盆山体系对下、上组合海相地层的改造

大巴山盆山体系与江南隆起盆山体系复合的典型产物,是大巴山前缘构造带与川东-渝东隔挡式褶断带交汇处的喇叭形联合构造。在该联合构造的喇叭口处,发育一个对角线走向近 SN 和近 EW 的菱形构造盆地;在构造盆地内发育走向 NNE 的宽缓短轴向斜——黄金口向斜、

峰城向斜和南坝向斜;在向斜之间局部出现了线状的高陡背斜,例如双河场-毛坝背斜和五宝场背斜;而在 NE 向背斜和向斜上,叠加了多个走向 NW 的褶皱和断层,而且越靠近大巴山前缘叠加构造就越紧密。这些都是两个盆山体系联合和叠加作用的结果。

在川东北残留前陆盆地南部的宣汉-达县地区,江南隆起盆山体系的影响进一步增强。除了在双河场-宣汉一线发育有一些规模较小的 NW 向叠加褶皱之外,构造主体逐步转变成 NE 和 NNE 走向的隔挡式褶皱和断裂。其中,上形变层主要发育 NW 向断层,中形变层主要发育 NNE 向断层。中形变层的断层数量多、断距大,还发育走向 NE 的对冲构造带,表明印支运动前的 SE-NW 向挤压作用强烈。在横向上,由于所处构造位置的差异,海相地层的改造有 3 种类型^[17]:①强改造型,一般为高陡构造主体或两翼潜伏构造,核部常出露 T_{3x} ,正常压力带底界可到 T_{1j}^4 ,或根本就没有高压带,天然气弱富集,如七里峡主体、铁山北等构造;②中改造型,一般为高陡构造两翼断层下盘的潜伏构造,核部常出露 J_2 ,正常压力带底界可到 T_{1j}^4 ,天然气中等富集,如温泉井等构造;③弱改造型,一般为高陡构造中的背冲构造或宽背斜,核部常出露 J_2 ,正常压力带底界可到 T_{1j}^5 ,天然气较高富集,如五百梯、铁山坡等构造。

在川东-渝东隔挡式褶皱变形区,前震旦系基底埋深 7 000~9 000 m,仅有上、下组合海相层轻微卷入,属于薄皮式滑脱推覆变形区。根据岩层力学属性,在该区大致可分出 4 个强岩组和 4 个滑脱层^[17]。在川东-渝东隔挡式褶皱变形区,主滑脱面是第一滑脱层(震旦系底部)、第三滑脱层(志留系)和第四滑脱层(下三叠统膏盐层)。尽管上、下组合海相岩系也都遭到推覆切割,但滑脱距离较小,岩层的整体性较好,不仅下组合保存较为完整,上组合也仅有局部遭受剥蚀,区域性盖层基本上没有遭受严重破坏,3 套区域盖层($T_2-J_3 \in C_1$)连片分布。早期处于油气横向运移的平缓斜坡区,气藏形成时位于古隆起边缘,油气藏保存条件较好。

隔槽式褶皱冲断变形带属于半厚皮式逆冲推覆变形带——上、下组合海相层与元古界基底

在一定程度上卷入, 在靠近挤出变形带的地方被切割成叠瓦状逆冲岩片。上组合海相层在多数地方剥蚀严重, 区域性盖层遭到损毁, 但在远离挤出变形带的地方下组合背斜完整性好且圈闭巨大, 油气藏保存条件较好。隔槽式褶皱冲断变形带的形成, 与强岩组在侧向挤压下的层间相对滑动和滑脱层弹粘性流动有关。在这里, 中深部强岩组主要形成同心褶皱, 曲率半径随深度增加而递减, 到第一滑脱层后岩层弯曲作用消失; 中浅部强岩组之间的滑脱层形成拖曳褶皱, 其中主背斜上产生的不对称拖曳褶皱常成带分布。在第三滑脱层处, 由于弯滑褶皱作用和塑性流动作用, 常形成顶厚翼薄的不协调褶皱。背斜中常发育压扭成因的 Y 字型断裂, 其主干多数深达基底。第四滑动层则形成顶薄翼厚的不协调褶皱, 可能与嘉陵江组二段和雷口坡组 (或巴东组) 石膏层的固体流变性质有关——在重力参与下发生流动^[17]。此外, 受岩性强弱组合控制, 在不同地区背斜轴面倾向不同。石柱复向斜以东轴面主要倾向 SE, 方斗山背斜带以西轴面主要倾向 NW; 主干逆断层则以倾向 SE 为主, 倾向 NW 为辅, 断面常呈上陡下缓的犁状。

基底挤出式变形带属于厚皮式逆冲推覆变形带, 元古界和震旦系以上地层均卷入变形, 一些地表可以识别的大型逆冲断层明显切入基底。该带志留系以上地层已经被剥蚀殆尽, 而残留奥陶系中的褶皱相对宽缓, 表明构造变形以基底冲断体挤出方式为主。

3.3 龙门山—大巴山—江南隆起复合盆山体系

龙门山盆山体系与江南隆起盆山体系也在一定程度上发生过联合式和叠加式复合作用, 但由于二者相距较远, 除了形成共同的前陆隆后盆地——面积巨大的川中坳陷 (或称川中低凸起) 外, 其他的复合变形表现不很显著。研究结果表明, 龙门山、大巴山、江南隆起构造带及其前陆盆地, 在印支以来的长期盆山耦合演化和复合演化过程中, 除了两两交叉形成复合盆山体系外, 还最终形成了“三山一盆”的巨型复合盆山体系——龙门山—大巴山—江南隆起复合盆山体系, 简称上扬子复合盆山体系。今天的四川盆地, 实际上就是这个巨型复合盆山体系共同的前陆盆地, 包含了每个盆山体系自己的主控前陆盆

地 (川西坳陷、川东北坳陷、湘鄂西—黔渝东坳陷) 及其前陆隆起 (龙泉山隆起、川中坳陷北缘隆起、开江—泸州隆起) 和共同的前陆隆后坳陷——川中坳陷。

根据对各自前陆盆地和川中坳陷的影响次序分析, 这 3 个盆山体系的造山作用均开始于印支运动早期, 但完成的时间有先后。其中, 龙门山南段完成最早, 为晚三叠世; 龙门山北段与米仓山—大巴山其次, 为早侏罗世; 江南隆起经过两期叠加, 完成时间最晚, 大致是中侏罗世^[18]。上扬子巨型复合盆山体系在喜马拉雅期还遭受来自印度板块推挤和滑移作用的影响。四川盆地成为今天的形状, 特别是其西南侧的隆起和围限, 与此有密切关系。就前陆盆地遭受同期和后期改造程度而言, 最强烈的是江南隆起前陆盆地, 其次是米仓山—大巴山前陆盆地, 最弱的是龙门山前陆盆地。川中坳陷在各期构造作用中的变形都很微弱。

4 南方海相盆地原型在印支—早燕山期后的叠加改造

在印支—早燕山期后, 由于华南与华板块的拼合, 古特提斯洋封闭, 南方地区整体进入挤压型盆山体系和复合盆山体系的改造阶段以及华南断陷盆地的形成和演化阶段。

受印欧板块碰撞和浙闽粤东侧板块俯冲控制, 南方海相盆地原型在燕山—喜马拉雅运动中的改造大致经历了 J_3-K_1 压扭背景下的挤压冲断及走滑、 K_2-E 伸展背景下的裂陷盆地叠加、 $E-N$ 初期大规模隆升剥蚀、 $N-Q$ 区域性披覆层形成等几个阶段。

1) J_3-K_1 压扭背景下的挤压冲断及走滑作用对南方地区海相盆地原型的改造, 是使上、下组合海相地层随着印支—早燕山期前陆盆地卷入大规模的挤压冲断及走滑变形、因伴随的大规模火山喷发和岩浆侵入活动而发生热变质作用, 以及在总体挤压扭动背景下局部叠加了一些张性盆地。例如, 中、下扬子区中、古生界海相地层中的对冲构造、东南沿海地区的大规模晚燕山期岩浆活动以及南方东部地区的一些晚侏罗世、早白垩世走滑裂陷盆地。

2) K_2-E 裂陷盆地的叠加与早喜马拉雅期

的伸展背景有关。扬子西缘的景谷盆地和宾川盆地、中扬子的江汉盆地、下扬子的沿江盆地和苏北盆地以及浙闽粤地区的一系列小型断陷盆地等,均是这一时期伸展背景下的产物。 K_2-E 裂陷盆地的形成,使得经历过印支—燕山期挤压变形的古—中生代海相地层进一步解体成为一系列断块。在裂陷盆地发育处,古—中生代海相地层被深埋,从而改变了该区生储盖组合的结构和完整性,同时也改变了海相烃源岩有机质的成熟度及其生烃性能。早喜马拉雅期伸展背景的产生,可能与中国南方岩石圈在经历长期持续挤压、缩短、增厚、造山和重力失衡之后的去根、减薄、调整和均衡回升有关,值得进一步探讨。

3) $E-N$ 初期的大规模隆升剥蚀是喜马拉雅运动的结果。印度板块和太平洋板块从东侧和西南侧对欧亚板块的碰撞、俯冲和挤压,导致中国南方印支—早燕山期挤压型盆山体系、复合盆山体系和中燕山—早喜马拉雅期伸展盆地发生褶皱回返和大规模走滑。在三江地区、龙门山、米仓山—大巴山以及四川盆地、楚雄盆地、十万大山盆地和南盘江盆地,表现尤为明显。这种褶皱回返和走滑活动,一方面使造山带和走滑断裂两侧的古—中生代海相地层进一步解体,并遭受严重剥蚀;另一方面却阻止了裂陷盆地处古—中生代海相地层的继续深埋,从而有利于冻结其烃源岩有机质的成熟度并保持其生烃性能。该时期挤压隆升作用总体上是从沿海向内陆、从西南向中部逐渐发展的。

4) $N-Q$ 区域性披覆层形成于南方处于均衡沉降的大、中型沉积盆地地区。这种区域性披覆层可以作为区域性盖层,不仅对华南古—中生代海相地层的油气成藏有利,也对华南中燕山期以来各期裂陷盆地中所沉积的中、新生代陆相地层的油气成藏有利。与此同时,由于印度板块和太平洋板块的持续作用,在西南三江地区、上扬子地区和下扬子地区,仍然继承 $E-N$ 初期的大规模隆升剥蚀作用。然而,在一些主要活动断裂附近,也形成了一些小型走滑裂陷盆地。

5 结论

1) 印支—早、中燕山期是中国南方海相盆地由以建造为主的阶段进入以改造为主的阶段

的转折点和过渡期,形成了一系列规模和结构不同、变形复杂的盆山体系。这些盆山体系实际上是一种“复合盆山体系”,起因于古特提斯多岛洋的闭合及多岛块之间的聚合、碰撞。

2) 华南复合盆山体系有两山一盆、三山两盆、三山一盆等多种组合类型。典型的事例是龙门山、大巴山和江南隆起之间两两交叉复合,形成了龙门山—大巴山、大巴山—江南隆起和龙门山—江南隆起复合盆山体系,进而形成了“上扬子复合盆山体系”。

3) 上扬子复合盆山体系的共同“前陆盆地”是四川盆地。它包括各造山带主控的前陆盆地(川西坳陷、川东北坳陷、湘鄂西—黔渝东坳陷)、前陆隆起(龙泉山隆起、川中坳陷北缘隆起、川东隆起)和共同的前陆隆后坳陷(川中坳陷或称川中低凸起)。

4) 江南隆起盆山体系由印支期和早燕山期两个盆山体系叠加而成。其前陆变形分带呈规律性分布,由江南隆起向西北依次为基底挤出式冲断—褶皱带、隔槽式褶皱带和隔挡式褶皱带。

5) 受印欧板块碰撞和浙闽粤东部外侧板块俯冲作用的控制,中国南方海相盆地原型的改造经历了 J_3-K_1 压扭背景下的挤压冲断及走滑改造、 K_2-E 伸展背景下的裂陷盆地叠加改造、 $E-N$ 初期大规模隆升剥蚀改造、 $N-Q$ 区域性披覆层叠加改造等几个发展阶段。

致谢:感谢中国石油化工股份有限公司南方勘探开发分公司马永生、郭彤楼教授和付孝悦、冷德勋高级工程师在研究中所给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 Osborne D G. The hydrocarbon potential of the western Papuan basin foreland with reference to worldwide analogues [A]. In: Caman G J, Caman Z, eds. Petroleum exploration in Papua New Guinea [C]. Port Moresby, Papua New Guinea: Papua New Guinea (PNG) Chamber of Mines and Petroleum, 1990: 197-213.
- 2 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 等. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分 [J]. 地球科学, 1999, 24(1): 1~12.
Yin Hongfu, Wu Shunbao, Du Yuansheng et al. South China defined as part of Tethyan archipelagic ocean system [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(1): 1~12.
- 3 Cross T A. Tectonic controls of foreland basin subsidence and laminar style deformation, western United States in “foreland

- basin" [A]. In Allen A, ed Special publication of the international association of sedimentologists [C]. Blackwell Oxford International 1986 15-39
- 4 刘少峰. 前陆盆地几种构造—沉积演化模式综述 [J]. 地质科技情报, 1991, 10(4): 39~44
Liu Shaofeng Several types of tectono-depositional evolution models of foreland basins [J]. Geological Science and Technology Information, 1991, 10(4): 39-44
 - 5 Kuhlmann J, Kampf O. Foreland basin geometry and facies response to the tectonic setting of the Alpine orogen [A]. In Gaupp R, Klaw S, eds Deutsche geologische gesellschaft [C]. Hanover Federal Republic of Germany, 2001. 62-63
 - 6 刘宝珺, 许效松, 潘杏南, 等. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿 [M]. 北京: 科学出版社, 1993. 1~360
Liu Baojun, Xu Xiaosong, Pan Xingnan, et al Continental sedimentation, lithosphere evolution and metallogeny in southern China [M]. Beijing Science Press, 1993. 1-360
 - 7 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化 [M]. 北京: 地质出版社, 1996. 89~162
Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui, et al The formation and development of Sichuan basin [M]. Beijing Geological Publishing House, 1996. 89-162
 - 8 王金琪. 安县构造运动 [J]. 石油与天然气地质, 1990, 11(3): 223~234
Wang Jinqi The Anxian tectogenesis [J]. Oil & Gas Geology, 1990, 11(3): 223-234
 - 9 杨克明, 朱彤, 何鲤. 龙门山逆冲推覆带构造特征及勘探潜力分析 [J]. 石油实验地质, 2003, 25(6): 685~693
Yang Keming, Zhu Tong, He Li Structural characteristics and exploration potential of the thrust block in Longmenshan [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(6): 685-693
 - 10 乐光禹. 大巴山造山带及其前陆盆地的构造特征和构造演化 [J]. 矿物岩石, 1998, 18(增刊): 8~15
Yue Guangyu Tectonic characteristics and tectonic evolution of Dabashan orogenic belt and its foreland basin [J]. Mineral Petrology, 1998, 18(S0): 8-15
 - 11 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 等. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程 [M]. 北京: 地质出版社, 1992. 1~190
Xu Zhiqin, Hou Liwei, Wang Zongxiu, et al Orogenic processes of the Songpan-Ganze orogenic belt of China [M]. Beijing Geological Publishing House, 1992. 1-190
 - 12 罗志立. 龙门山造山带的崛起和四川盆地的形成与演化 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1994. 1~564
Luo Zhili Uplift of Longmen mountain orogenic belt and the formation and evolution of Sichuan basin [M]. Chengdu Press of Chengdu University of Science and Technology, 1994. 1-564
 - 13 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 1~855
Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al Qinling orogenic belt and continental dynamics [M]. Beijing Science Press, 2000. 1-855
 - 14 余晓宇, 徐宏节, 何治亮. 江苏下扬子区中—古生界构造特征及其演化 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 226~236
She Xiaoyu, Xu Hongjie, He Zhiliang Tectonic characteristics and evolution of Mesozoic and Paleozoic in Lower Yangtze region, Jiangsu [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(2): 226-236
 - 15 刘树根, 罗志立, 赵锡奎, 等. 试论中国西部陆内俯冲型前陆盆地的基本特征 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 37~56
Liu Shugen, Luo Zhili, Zhao Xiku, et al Discussion on essential characteristics of intracontinental-subduction type foreland basins in western China [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 37-56
 - 16 Howell D G, Fehri N, Kenneth J Thin-versus thick-skinned thrusting in the central Brooks Range orogen, Alaska: constraints based on surface geology [A]. In AGU 1991 fall meeting Anonymous eos transactions [C]. Washington D C, United States American Geophysical Union, 1991. 295
 - 17 马力, 陈焕疆, 甘克文, 等. 中国南方大地构造和海相油气地质 (上) [M]. 北京: 地质出版社, 2004. 3~42
Ma Li, Chen Huanjiang, Gan Kewen, et al Geotectonics and petroleum geology of marine sedimentary rocks in southern China (Book 1) [M]. Beijing Geological Publishing House, 2004. 3-42
 - 18 刘树根, 赵锡奎, 罗志立. 龙门山造山带—川西前陆盆地系统构造事件研究 [J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(3): 221~230
Liu Shugen, Zhao Xiku, Luo Zhili Study on the tectonic events in the system of the Longmen Mountain—West Sichuan foreland basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(3): 221-230

(编辑 李 军)