

# “低山深盆型”盆山体系的形成过程及其耦合模式： 以江汉盆地为例

吴路路<sup>1,2,5</sup>，范宇辰<sup>1</sup>，刘昭茜<sup>2\*</sup>，郭丽彬<sup>3</sup>，沈雷<sup>3</sup>，张朋<sup>4</sup>，  
沈传波<sup>2\*</sup>，梅廉夫<sup>2</sup>

1 河南理工大学能源科学与工程学院，河南焦作 454003

2 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室，湖北武汉 430074

3 中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司勘探开发研究院，湖北武汉  
430223

4 中国地质大学（北京）海洋学院，北京 100083

5 深井岩层控制与瓦斯抽采技术科技研发平台，河南焦作 454003

**摘要：**目前，盆山耦合理论已形成广泛共识，然而该理论在解释裂陷盆地及其周缘山系的耦合过程中还存在较多问题。为了阐明伸展体制之下的盆山耦合关系，研究以江汉盆地及周缘山系为例，基于野外露头、钻井与地震资料、地球化学与热年代学数据的综合分析，系统揭示了盆山构造演化过程。结果表明：周缘山系先后经历了快速冷却、持续冷却、缓慢冷却和快速冷却阶段，相应地，盆地则经历了基底挤压变形、热隆升、裂陷沉降和拗陷演化；软流圈地幔在驱动盆地裂陷沉降的同时，也带来了大量的深部复合物质。研究认为，在“低山深盆型”盆山体系形成过程中，盆地不断沉降、变深，而周缘山系不断剥露、变低。盆山之间的耦合模式为“周缘山系塑盆、山系剥露填盆、盆地增温暖山”。

**关键词：**盆山体系；盆山耦合；热历史；裂陷演化；地幔上涌；江汉盆地

**中图分类号：**P618

**收稿日期：**2025-11-20

---

**基金项目：**国家自然科学基金（No. 42302171，42372181）、中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室开放基金（TPR-2023-02）

**第一作者简介：**吴路路，1989-，男，副教授，主要从事盆地及石油勘探构造分析研究。ORCID：0000-0002-2667-3516。E-mail：llwu@hpu.edu.cn

**通讯作者简介：**刘昭茜，1982-，女，副教授，从事石油与天然气地质学、构造与成藏年代学、有机地球化学研究。ORCID：0000-0003-2601-2301。E-mail：liuzhaoqian@cug.edu.cn；沈传波，1979-，男，教授，博士生导师，主要从事盆地及石油勘探构造分析研究。ORCID：0000-0001-5641-9714。E-mail：[cbshen@cug.edu.cn](mailto:cbshen@cug.edu.cn)

# **Formation and coupling model of the basin-mountain systems characterized by “low mountain, deep basin”:**

## **Evidence from the Jiangnan Basin**

Lulu Wu<sup>1,2,5</sup>, Yuchen Fan<sup>1</sup>, Zhaoqian Liu<sup>2\*</sup>, Libin Guo<sup>3</sup>, Lei Shen<sup>3</sup>, Peng Zhang<sup>4</sup>,  
Chuanbo Shen<sup>2\*</sup>, Lianfu Mei<sup>2</sup>

1 School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China

2 Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education (China University of Geosciences), Wuhan 430074, China

3 Research Institute of Exploration and Development, Jiangnan Oilfield Branch Company, SINOPEC, Wuhan 430223, China

4 School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

5 Science and Technology R&D Platform of Emergency Management Ministry for Deep Well Ground Control and Gas Extraction Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China

**Abstract:** The basin-mountain coupling theory has been widely recognized; however, it does not work well when it comes to the basin-mountain systems in extensional regime. To unravel the basin-mountain coupling relationships under extensional regime, our study integrates field outcrops, borehole and seismic data, and geochemical and thermochronological data from the Jiangnan Basin and surrounding mountains, systematically clarifying their tectonic evolution. The surrounding mountains successively experienced rapid cooling, continued cooling, slow cooling and rapid cooling stages, and the Jiangnan Basin accordingly experienced compressional deformation, thermal doming, rifting and subsidence, and post-rift evolution. The upwelling of asthenospheric mantle not only drove the basin to undergo rifting and subsidence, but also delivered a large amount of deep composite materials to the basin. Our study proposes that the Jiangnan Basin got progressively deeper and deeper during the formation of the basin-mountain system, while the surrounding mountains got progressively lower and lower. The influence between the Jiangnan Basin and surrounding mountains is multi-faceted and single-directional.

Their coupling model can be summarized as follow: 1) surrounding mountains shape the basin; 2) mountain exhumation results in basin filling and 3) the basin with increasing heat input transfers heat to surrounding mountains.

**Keywords:** Basin-mountain system; Basin-mountain coupling; Thermal history; Rift evolution; Mantle upwelling; Jiangnan Basin

## 0 引言

沉积盆地与山系是地球表面最基本的构造单元，两者常常相伴而生。将盆山作为统一整体去研究的思想始于 20 世纪 90 年代（刘树根等，1995；牛树银等，1995；许效松和徐强，1996；王清晨等，1997；李勇，1998；吴根耀，1998），并成熟于 21 世纪第一个十年（刘和甫等，2000b；李奋其等，2002；刘德民和李德威，2002；李继亮等，2003；吴根耀和马力，2004；舒良树等，2004；张进等，2004；刘少峰和张国伟，2005；吴冲龙等，2006；郭战峰等，2007；李本亮等，2007；沈传波等，2007；贾承造等，2008；马宗晋等，2008），最终形成了较为一致的“盆山体系”或“盆山耦合”概念，即盆山具有在空间上相互依存、物质上相互供给、动力上相互转化的“三位一体”耦合关系（牛树银等，1995；舒良树等，2004；刘少峰和张国伟，2005）。随后，盆山耦合理论逐渐成为沉积盆地和山系研究的一个重要指导思想（如肖安成等，2011；汤良杰等，2012；李超，2019；吴磊等，2023；据宜文等，2025）。

在盆山关系不断发展、不断被证实的过程中，一些学者虽然已经意识到伸展体制下的盆山关系与挤压体制下的盆山关系有所不同，需要考虑深部地幔的加入和驱动作用，但是仍然沿用已有的“三位一体”耦合模式去建立伸展体制下的盆山关系（刘和甫等，2000a；徐杰等，2001；王清晨和李忠，2003；牛树银等，2006；李忠权等，2014；王德良等，2018）。这就导致在分析伸展体制下的盆山关系时，盆的演化与山的演化常常难以匹配，甚至有些格格不入，如江汉盆地强烈裂陷时间与山系快速剥露时间并不吻合（Ge et al., 2013；Shen et al., 2012, 2020；Wu et al., 2018, 2020b）。其实，仅从盆深和山高的关系就可以看出，两

种体制下的盆山关系存在很大的差异（图 1）。挤压体制下的盆山体系属于“高山深盆型”，盆深与山高正相关；伸展体制下的盆山关系属于“低山深盆型”，山系普遍较低，且盆深与山高没有明显相关性。也就是说，周缘山系的物质被搬运到了裂谷盆地，而裂谷盆地并没有同等的物质补偿过去，造成山系变低。该推断与现今的地壳结构相吻合（图 1d）。这种“非对称性”意味着“低山深盆型”盆山体系中盆山之间的相互作用方式、影响程度和耦合模式并非传统的“三位一体”。这是一种新的、被以往研究所忽略的盆山关系。该盆山耦合关系的揭示，不仅能够完善传统的盆山耦合理论，还对盆山研究和油气勘探具有重要指导意义。

江汉盆地位于华南大陆北缘，是一个白垩纪-新生代裂谷盆地（图 1a、2；Wu et al., 2018）。与塔里木等盆地不同，超过 10000 m 深的江汉盆地被平均海拔小于 2000 m 的山系所环绕，形成一个典型的“低山深盆型”盆山体系（图 2a）。江汉盆地丰富的钻井、地震和玄武岩岩心资料为系统揭示盆地的空间形态、结构样式、裂陷演化和深部动力学过程提供了充分的资料保障，而前人对周缘山系热历史的大量研究也使山系热演化历史清晰再现出来（Zhang et al., 2009；Wu et al., 2018；Wu et al., 2018, 2020a, 2020b；Ge et al., 2013；Ji et al., 2014；Shen et al., 2012, 2016, 2020；Tian et al., 2025）。得益于这些资料和数据，江汉盆地及周缘山系成为研究“低山深盆型”盆山体系的理想实验室。本研究也以此建立了完整的盆山演化序列，通过对比分析，揭示了“低山深盆型”盆山体系的形成过程与耦合模式，对同类型盆山体系研究具有重要借鉴意义，同时丰富了盆山耦合理论。

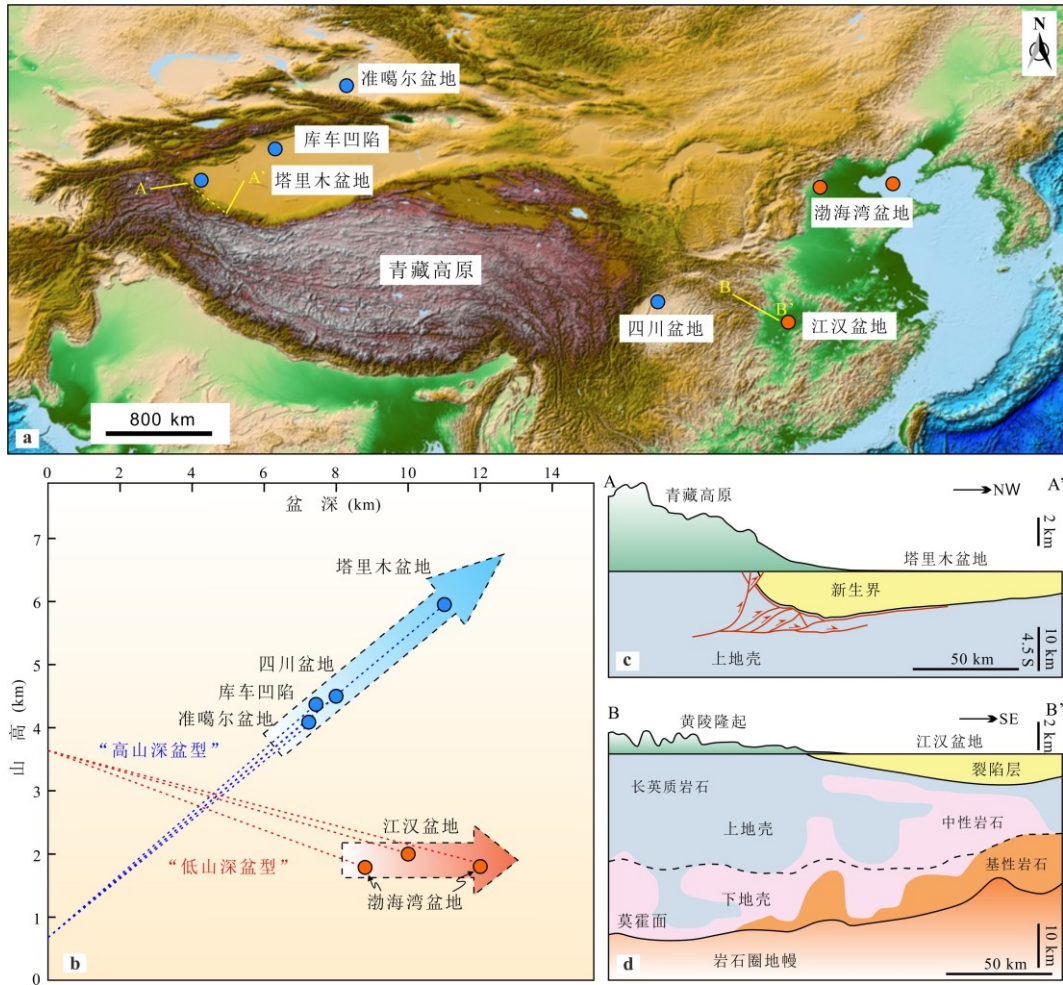


图 1 中国代表性盆山体系的分类 (a、b) 与结构特征剖面图 (c、d)

Fig. 1 (a-b) Classification and (c-d) sectional architecture of the representative basin-mountain systems in China

a, 据 Amante and Eakins, 2009 修改; b, 数据来自贾承造等, 2008; 李智武等, 2021; 徐振平等, 2024; 吴海等, 2024; Xiang et al., 2024; 赵邦六等, 2024; Wu et al., 2025; Zhang et al., 2025; c, 据李超, 2019; Xiang et al., 2024 修改; d, 据 Zhang et al., 2009 修改

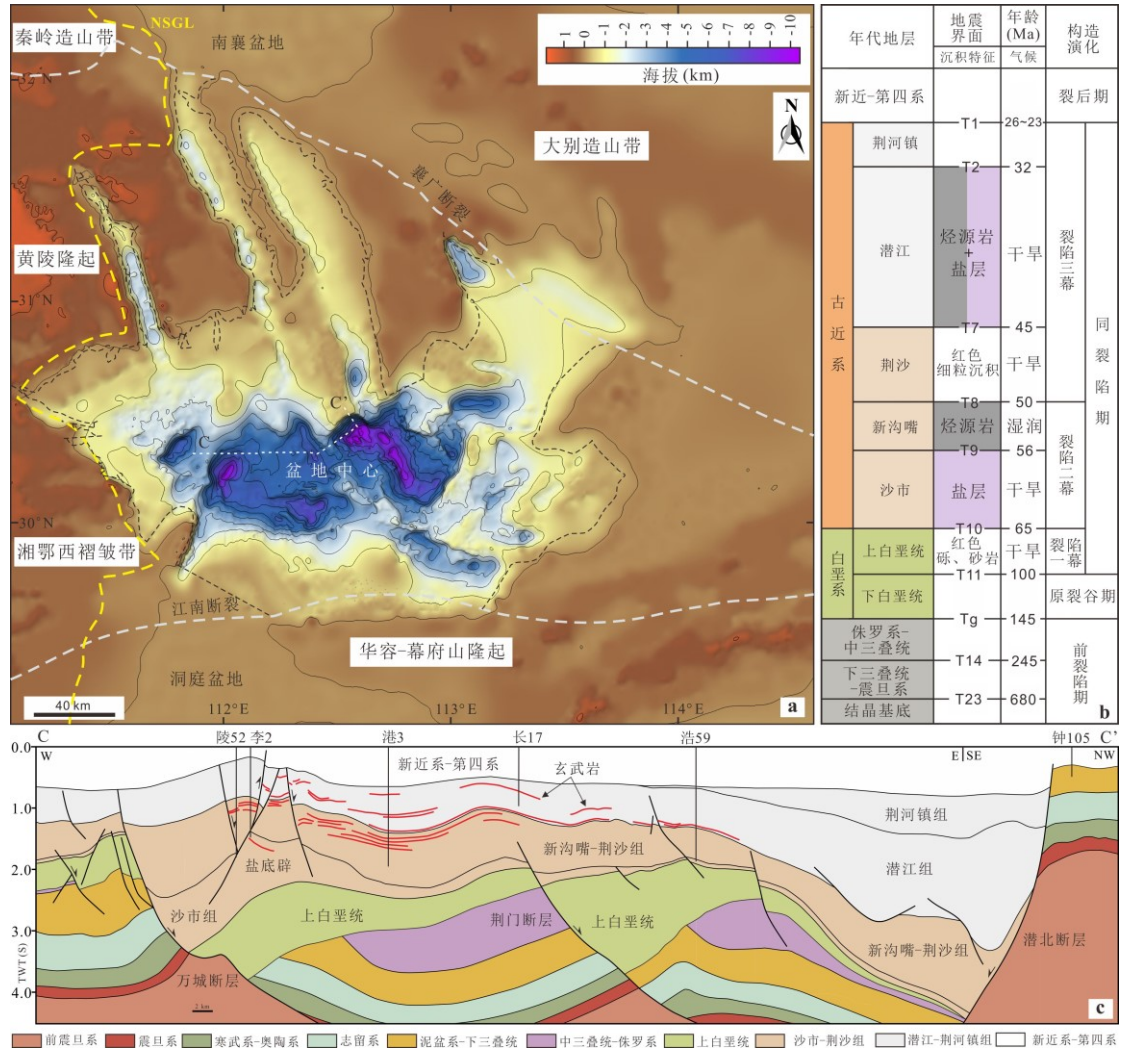


图2 (a) 江汉盆地及周缘山系现今盆地埋深与山系高程等值线图；  
(b) 江汉盆地地层柱状图；(c) 江汉盆地近东西向骨架剖面图

Fig. 2 (a) Present basin depth and mountain elevation of the Jiangnan Basin and its surrounding mountains; (b) Stratigraphy column of the Jiangnan Basin; (c) Nearly E-W-trending seismic profile crossing the Jiangnan Basin.

## 1 地质背景

江汉盆地位于中国东部南北重力梯度带以东，形成于早燕山期的褶皱基底之上，先后经历了白垩纪-新生代两大裂陷旋回、三个幕裂陷幕次的强烈伸展作用，并伴随着强烈的火山作用（图2；吴路路，2019；Wu et al., 2018, 2020a, 2020b）。盆地不规则的几何学形态和多段、多阶结构样式受控于多向控洼断裂体系，起源于前裂陷期（早燕山期）陆内多向汇聚塑造的复杂基底与逆冲构造（Wu et al.,

2020a)。江汉盆地被群山环绕，这些山系均在前裂陷期已经形成，因此江汉盆地及周缘山系形成的是盆山体系而不是盆岭体系(参考刘和甫等, 2000; 李忠权等, 2014)。这些周缘山系可以细分为两大类: 1) 处于重力梯度带以西、几乎没有遭受伸展作用的秦岭造山带、黄陵隆起与湘鄂西褶皱带; 2) 处于重力梯度带以东、伸展体制之下的大别造山带与江南隆起(图 2a)。整体上, 西部没有遭受伸展作用的山系高于东部伸展体制之下的山系。

江汉盆地裂陷层包括白垩系与古近系, 其中白垩系主要以红色、红棕色砾岩、砂岩为主(Wu et al., 2018)。古近系被分为 5 个组, 其中沙市组为干旱环境形成的富盐沉积, 新沟嘴组为较湿润环境形成的烃源岩, 荆沙组为干旱环境形成的红色、红灰色细粒沉积, 潜江组为干旱环境形成的富盐和富碳沉积(吴路路, 2019 及所附参考文献; 王必金等, 2024; Sun et al., 2025)。可以看出, 即使气候条件与裂陷作用相似, 盆地沉积也发生了很大变化, 如干旱气候、萎缩裂陷、局限湖盆条件下沉积的沙市组与潜江组(图 2)。这意味着盆山配置关系扮演着重要角色。

## 2 数据与方法

本研究使用的数据包括大于 8000 km 的二维地震测线、约 5000 km<sup>2</sup> 的三维地震工区、约 1600 口钻井资料、22 块玄武岩样品、野外露头信息、周缘山系热年代学数据(包括磷灰石-锆石裂变径迹与 (U-Th)/He 数据、云母 Ar-Ar 年龄)以及公开的地形高程数据(彭头平等, 2006; Shen et al., 2012, 2016, 2020; Ge et al., 2013; Ji et al., 2014; Wu et al., 2018, 2020a, 2020b; 吴路路, 2019; Tian et al., 2025)。研究首先基于绘制的基底地质图重建晚侏罗世盆地古构造格局, 厘定前裂陷期周缘山系对盆地基底的塑造作用(Wu et al., 2020a)。在此基础上, 结合周缘山系的热年代学数据, 分析周缘山系的剥露过程, 明确周缘山系的热演化历史(Ge et al., 2013; Ji et al., 2014; Shen et al., 2012, 2016, 2020; Tian et al., 2025 及所附参考文献)。在前人研究基础上, 将地层厚度、沉降中心分布特征、地层接触关系及断裂几何学-运动学特征系统梳理出来, 阐明盆地裂陷作用的时空变化特征(Wu et al., 2018, 2020b)。火山作用强度是裂谷盆地研究的难点, 本研究利用不同时期玄武岩厚度与面积对其进行定量分析, 并根据全

岩地球化学特征，阐明盆地深部动力学过程 (Wu et al., 2020b)。本研究优选了地幔源区同位素组成 (全岩 Nd-Hf 同位素) 和部分熔融程度 (La/Yb、Sm/Yb) 两个关键参数来重建深部软流圈地幔运动过程。基于构造-地层-岩浆数据的综合分析，系统揭示盆地的构造演化过程 (Wu et al., 2020b)。在这些工作的基础上，将盆山演化过程进行对比分析，厘定盆山在空间位置、物质与动力上的关联性，恢复重建出主要时期盆山的古海拔示意图，最终阐明“低山深盆型”盆山体系的形成过程，并建立新的盆山耦合模式。由于盆地对山系温度的影响，导致热年代学数据不再适用于山系剥蚀厚度的恢复。因此，在绘制盆山古海拔示意图时，盆内的古海拔和地形数据来自地层厚度，较为准确，而山系的古海拔则依据其现今地貌特征和构造演化过程进行示意性赋值，不同时期山系的相对海拔是本研究分析的重点。

### 3 盆山构造演化过程

#### 3.1 周缘山系热历史

根据江汉盆地基底地质图重建的晚侏罗世盆地古构造格局表明，前裂陷期江汉盆地遭受来自秦岭-大别造山带 SW 向挤压作用、江南隆起 NW 向挤压作用和黄陵隆起的阻挡作用，形成了多向逆冲断裂体系和一个变形强烈的对冲带 (图 3; Wu et al., 2020a)。晚侏罗世末，周缘山系在经历长期的陆内造山作用后，最终定型。由此推断，其海拔在晚侏罗世末已达到较大高度。而此时江汉盆地尚未形成，广泛分布着褶皱和逆冲断层，属于造山带前的褶皱冲断带。由于变形时间较晚，盆内海拔相对造山带应低一些。

从热年代学数据揭示的周缘山系冷却历史可以看出，晚侏罗-早白垩世与新近纪以来，周缘山系处于快速冷却阶段；晚白垩世-古近纪，周缘山系处于缓慢冷却阶段 (图 4; Ge et al., 2013; Ji et al., 2014; Shen et al., 2012, 2016, 2020; Tian et al., 2025)。晚侏罗世与早白垩世都为快速冷却，但两者的成因不同：前者是周缘山系快速隆升的结果，此时区域遭受广泛的陆内造山作用；后者是周缘山系快速剥露的结果，此时区域挤压作用已经停止并进入较弱伸展阶段 (Wu et al., 2018)。晚白垩世-古近纪，除了早白垩世花岗岩自身冷却导致的快速冷却外，周

缘山系整体上处于缓慢冷却阶段。该缓慢冷却作用是否指示缓慢剥露作用有待进一步分析，原因在于此时周缘山系正向盆内供应大量物质，应该处于快速剥露阶段。新近纪以来，周缘山系处于快速冷却阶段（图 4）。尽管此时区域普遍存在一期快速冷却热事件，但缺少强烈挤压变形的证据，因此挤压作用造成的山系隆升量是有限的。推测该快速冷却可能与同期盆地的快速冷却原因一致（受控于深部的热衰减），也可能受气候变化的影响（Shen et al., 2016; Tian et al., 2025）。因此，在江汉盆地同裂陷期，周缘山系热历史的成因出现了多解性，用传统的“冷却-剥露”模式已经难以自圆其说，需要结合盆地构造演化过程进行新的模式构建。

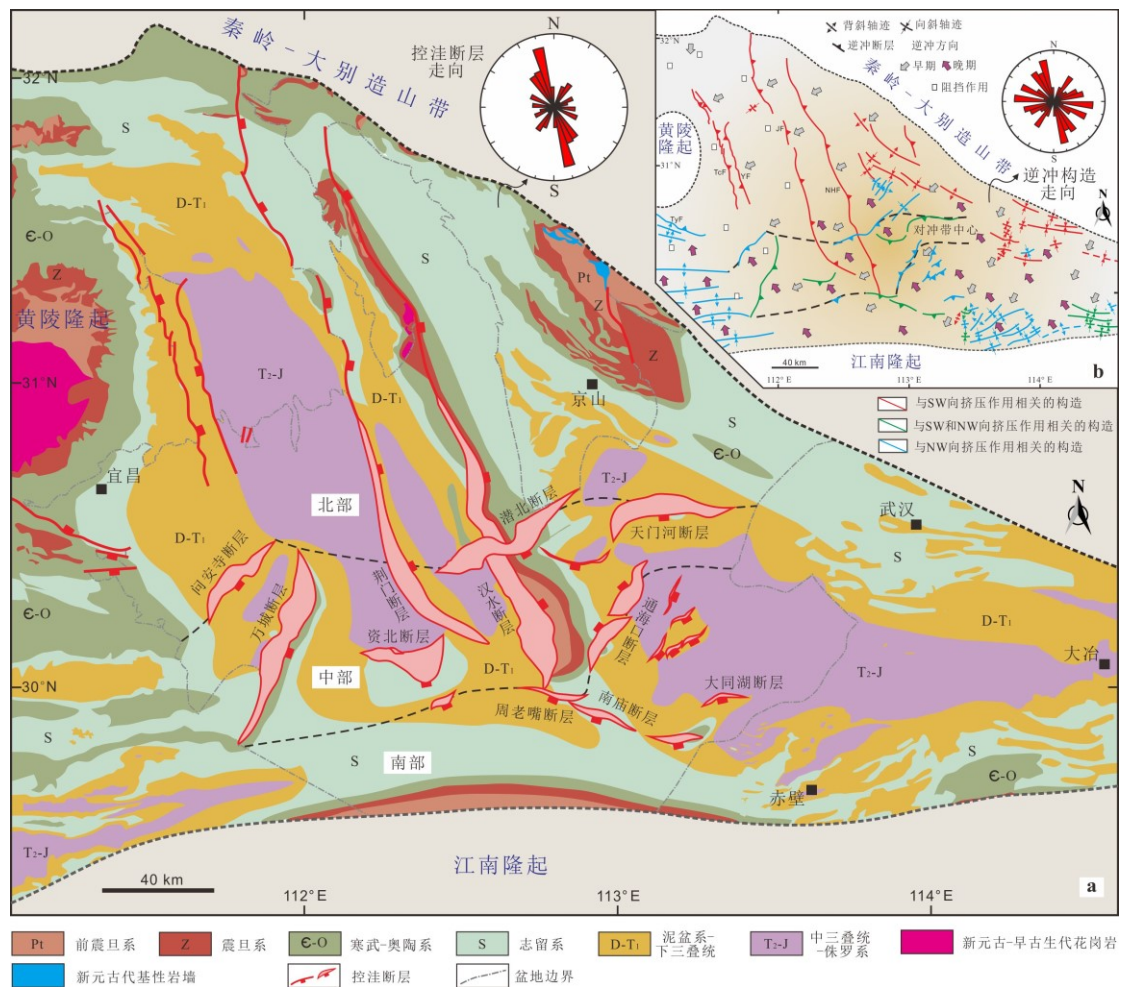


图 3 江汉盆地及邻区基底地质图 (a) 与晚侏罗世古构造格局图 (b)

Fig. 3 (a) Basement geological map and (b) late Jurassic tectonic map of the Jiangnan Basin and its adjacent region

据 Wu et al., 2020a 修改

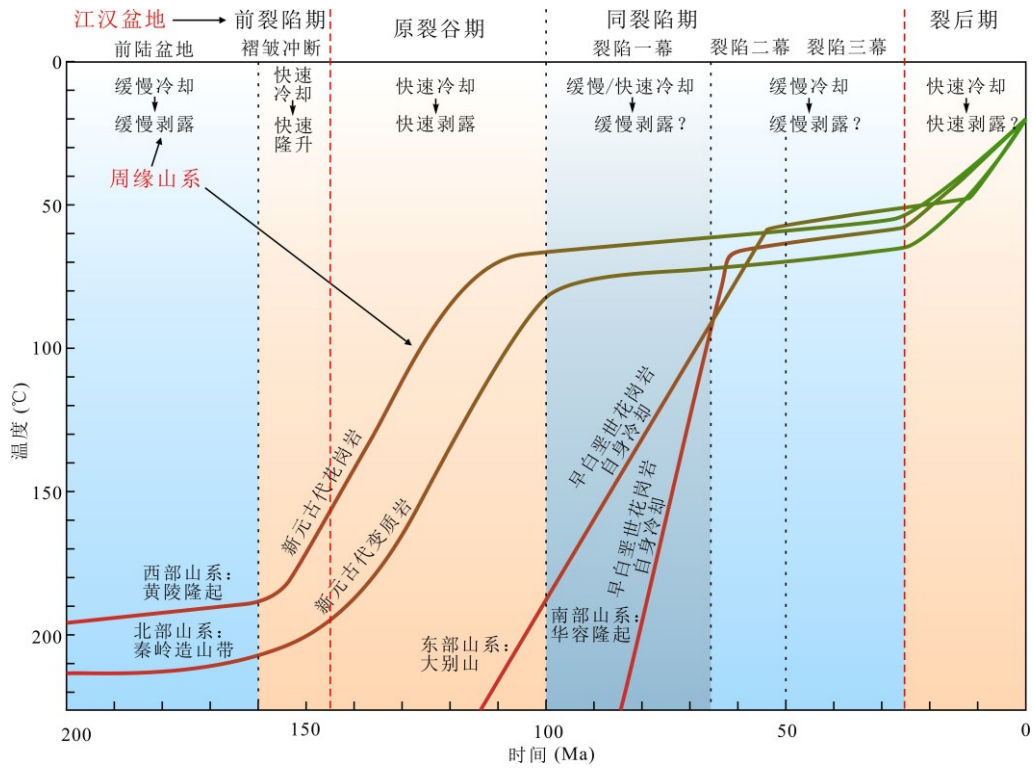


图 4 周缘山系晚侏罗世以来热历史

Fig. 4 Late Jurassic to present thermal history of the surrounding mountains of the Jiangnan Basin  
 热史数据来自 Ge et al., 2013; Ji et al., 2014; Shen et al., 2012, 2016, 2020; Tian et al.,  
 2025 及所附参考文献

### 3.2 盆地构造演化过程

江汉盆地下白垩统局限分布在盆地边缘，可细分为石门组和五龙组，没有明显的断控特征（图 5a; Wu et al., 2018）。与之形成鲜明对比的是，上白垩统广泛分布于全盆，且厚度很大，断控特征明显，可细分为罗镜滩组、红花套组和跑马岗组（图 5b; Wu et al., 2018）。由于上白垩统沉积时间长达约 35 个百万年，所以计算出的断层活动速率并不大；考虑到地层总厚度大（最厚达 4500 m）且分布广，本研究将晚白垩世的裂陷作用归为大规模裂陷作用。野外露头显示，上、下白垩统之间为整合接触（图 5c、d）。该界面属性决定了早白垩世江汉盆地的构造属性，表明此时盆地已处于伸展背景（Wu et al., 2018）。

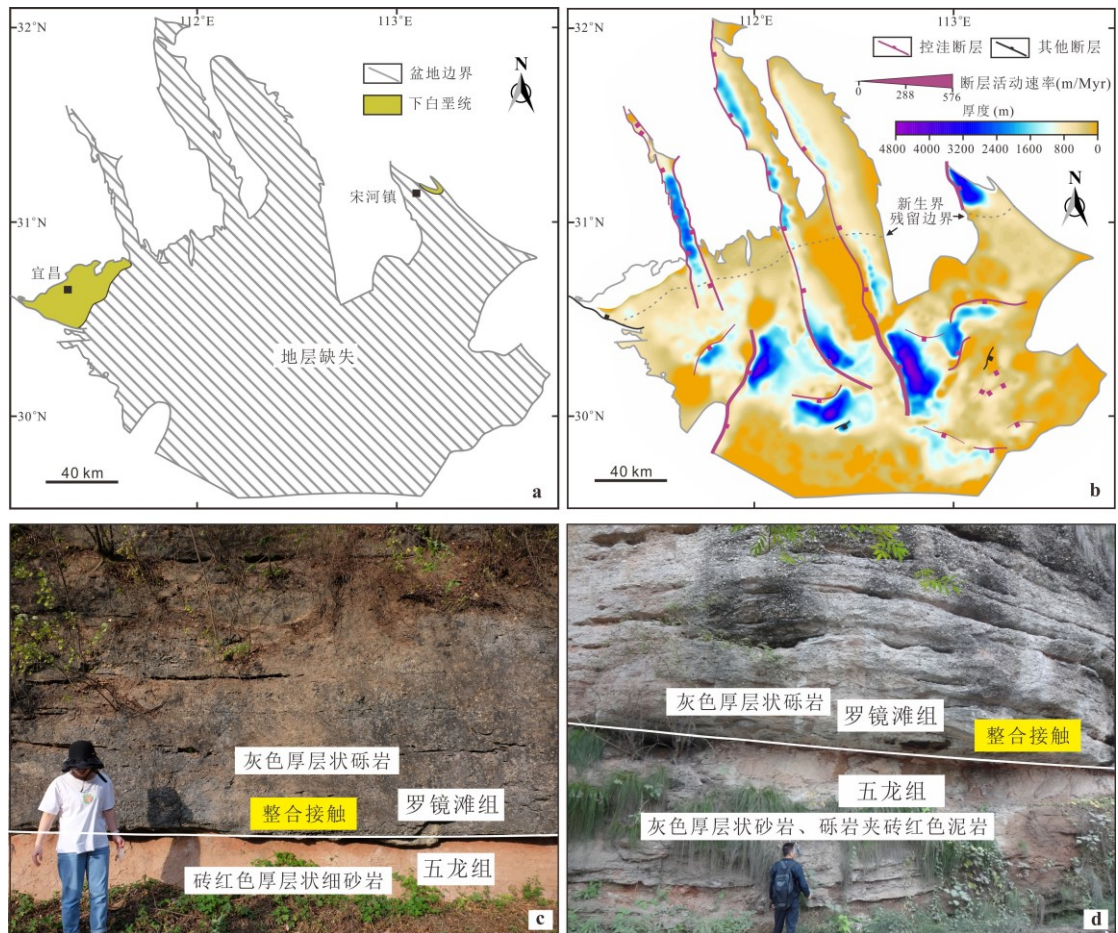


图5 江汉盆地上、下白垩统分布特征 (a、b) 与接触关系 (c、d)

Fig. 5 Distribution of Upper and Lower Cretaceous (a-b) and their stratigraphic contact (c-d).

a、d, 据 Wu et al., 2018

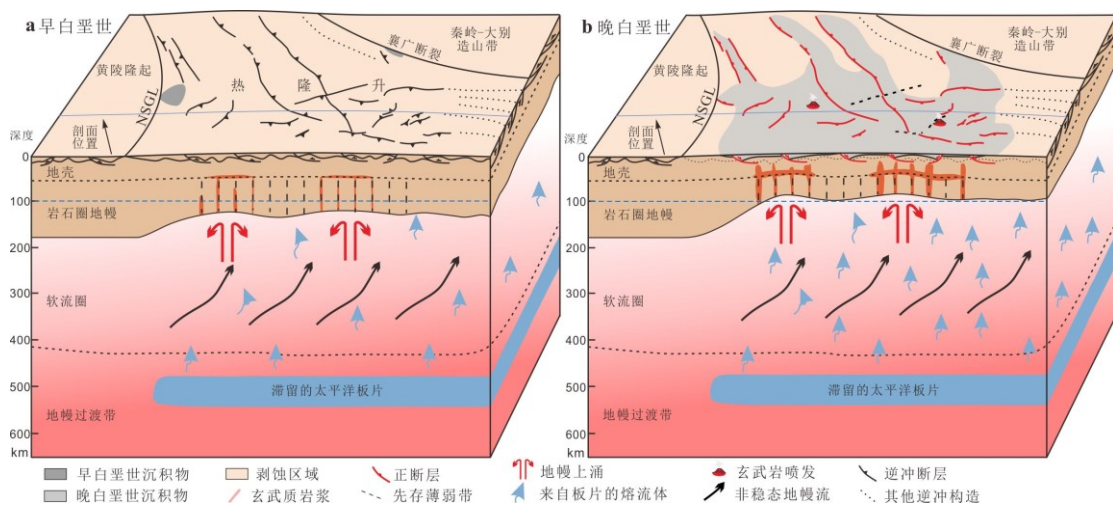


图6 江汉盆地白垩纪动力学过程示意图

Fig. 6 Cartoon diagrams illustrating the Cretaceous geodynamics of the Jiangnan Basin

据 Wu et al., 2018 修改

早白垩世，由于古太平洋板块回撤，华南大陆已进入大规模伸展阶段（Wu et al., 2018 及所附参考文献）。江汉盆地下白垩统分布特征表明盆地此时处于原裂谷期，即主体为热隆升，仅边缘发生沉积作用（图 6a）。然而，同为板块回撤与地幔上涌，为什么江汉盆地要先经历热隆升而华南大陆其他地区却直接进入裂陷演化阶段呢？这是由于江汉盆地缺少白垩纪之前的中生代岩浆作用，导致岩石圈没有遭受弱化或减薄，难以发生裂陷作用（图 6a）。需要注意的是，晚白垩世裂陷作用发生时，盆地经历了早白垩世的岩浆作用（Shen et al., 2012）。这说明岩浆作用能够作为岩石圈弱化的标志，也间接证明了上述推断。至于岩石圈是否必须减薄到前人提出的 100 km 以内才能发生裂陷作用（Wu et al., 2018 及所附参考文献），本研究认为该数值的最大意义在于表明克拉通岩石圈需要经历弱化或减薄作用才能发生裂陷作用。晚白垩世，由于古太平洋板块继续回撤，上涌的软流圈地幔诱发岩石圈发生大规模裂陷作用，使基底的多向先存逆冲断裂遭受伸展性活化（即负反转），形成了多向正断裂体系（图 6b）。

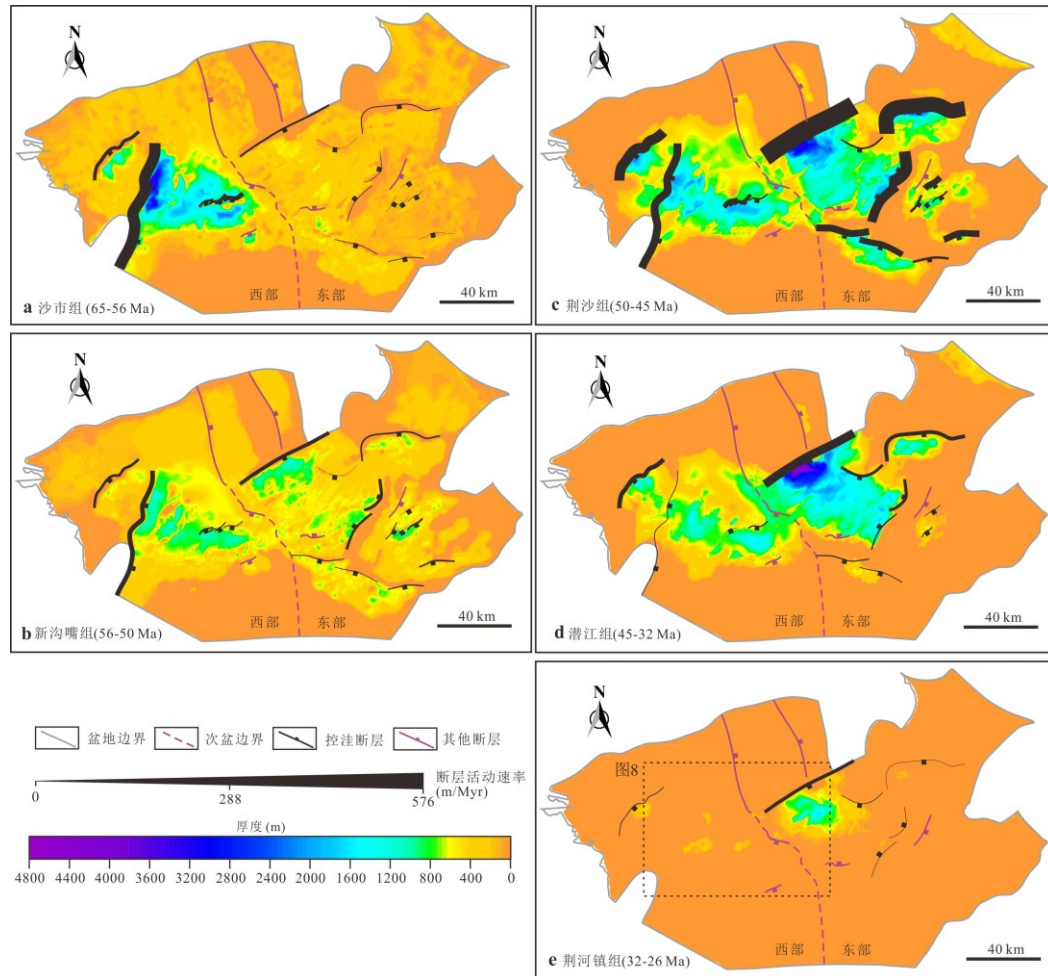


图 7 江汉盆地古近纪不同时期断层活动性与地层展布特征

Fig. 7 Paleocene fault activity rates of major faults and stratal thicknesses in the Jiangnan Basin

古近纪，盆地沉降作用主要集中在盆地中南部，NE 向断裂体系取代 NNW 向断裂体系占据主导地位（图 5b、7）。断层活动性和沉降中心呈逐步向东迁移的规律，同时断层活动性在裂陷三幕（50 Ma 以后）显著增强（图 7）。相对应地，裂陷三幕的火山作用规模明显大于裂陷二幕，呈显著增强特征（图 8）。总体上，江汉盆地火山岩（均为玄武岩）最大厚度达 400 m、面积达 1750 km<sup>2</sup>，是同裂陷期地幔强烈活动的信号。从玄武岩全岩 Nd-Hf 同位素组成与 La/Yb、Sm/Yb 比值可以看出，裂陷三幕地幔源区在同位素上的富集与不均一程度均大于裂陷二幕，而其地幔源区的部分熔融程度却小于裂陷二幕（图 9）。可见，不同裂陷幕，地幔源区发生了变化。更为关键的是，裂陷三幕，岩石圈虽然变得更薄，但地幔源区部分熔融程度却更小。对于此变化，最为合理的解释是南北重力梯度带以西、贫挥发分的软流圈地幔向东流动造成了南北重力梯度带以东、富含挥发分的软流圈地幔被“稀释”（图 10）。其“稀释”程度在裂陷三幕达到最大，因为明显增强的断层活动性和火山作用指示更大规模的地幔流（Wu et al., 2020b）。此外，地幔自西向东流动又与盆地逐步向东的构造迁移方向相吻合。因此，江汉盆地古近纪裂陷作用受控于深部地幔的流动与上涌。在地幔驱动盆地发生裂陷的过程中，地幔向盆地输送了大量物质（如岩浆、成矿物质、挥发分），还携带了来自基底地层的成岩元素（如 Ca/Mg 离子等）（图 10；Wu et al., 2020；刘成林等，2021）。

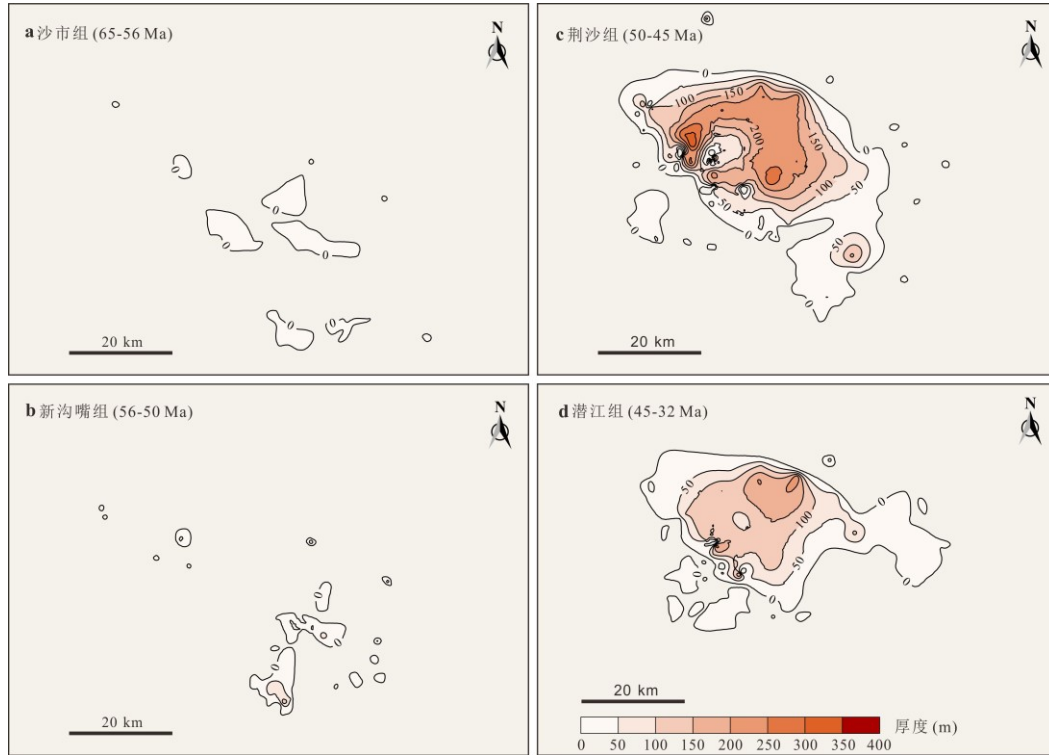


图 8 江汉盆地裂陷二幕-三幕玄武岩厚度图

Fig. 8 Thickness maps of the Jiangnan basalts during Rift Phases 2-3

位置见图 7e。

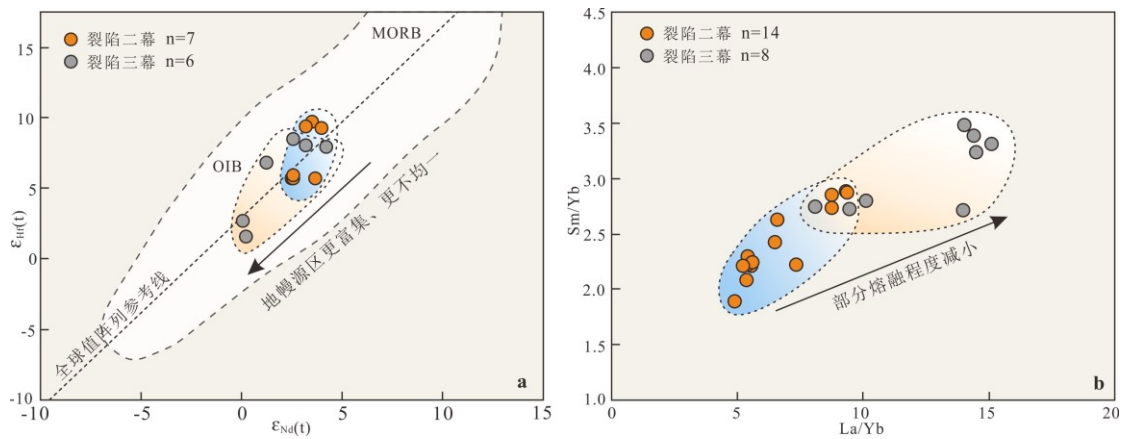


图 9 江汉盆地裂陷二幕-三幕玄武岩 Nd-Hf 同位素组成 (a) 与 La/Yb-Sm/Yb 散点图 (b)

Fig. 9 (a) Nd and Hf isotope compositions and (b) La/Yb vs. Sm/Yb diagrams of the Jiangnan

basalts during Rift Phases 2-3

数据来自彭头平等 (2006); 吴路路 (2019)

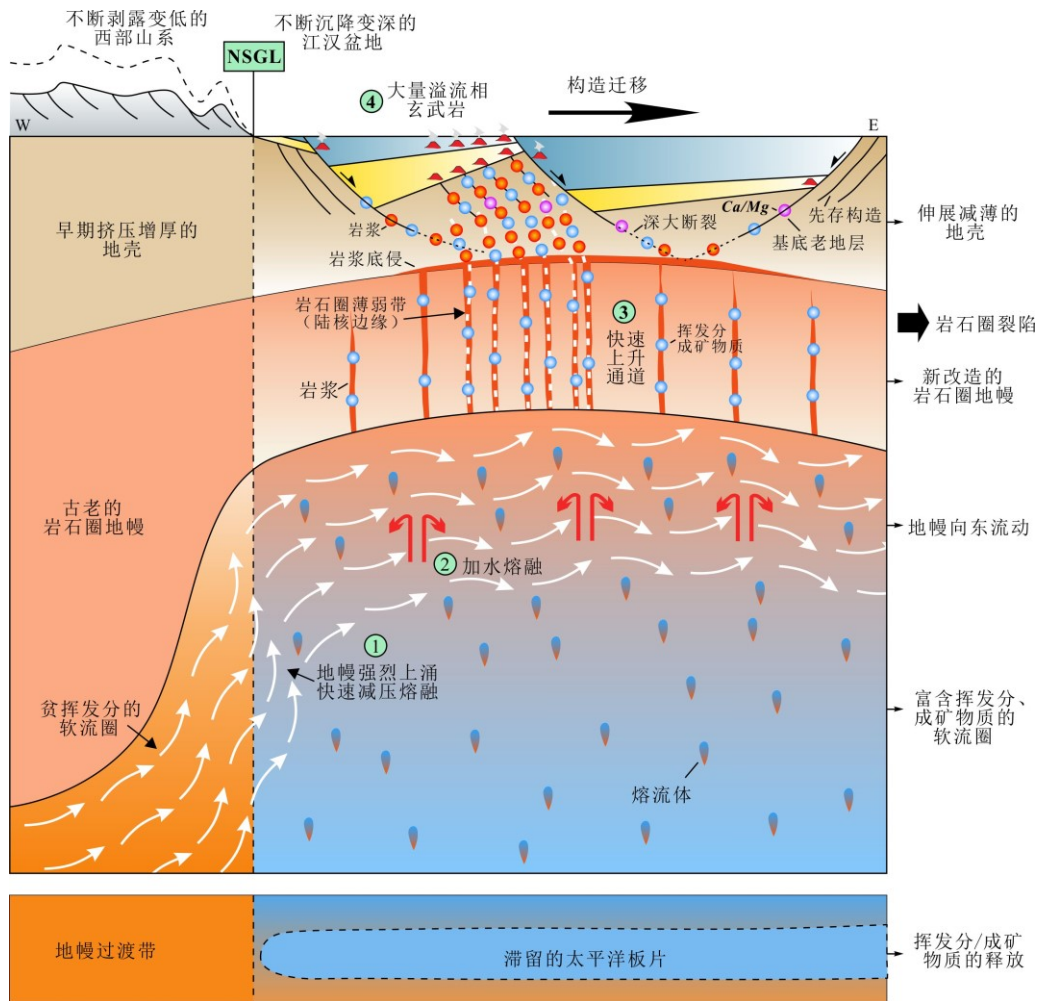


图 10 江汉盆地古近纪动力学过程与深部复合物质输入示意图

Fig. 6 Cartoon diagram illustrating the Paleogene geodynamics of the Jiangnan Basin, with plenty of deep composite material input

## 4 讨论

上述盆山构造演化过程表明，1) 盆山演化在同裂陷期具有“不一致性”，而在其他时期又吻合较好；2) 同裂陷期，盆地裂陷的驱动力来自深部地幔，与山系无关，而深部复合物质的输入对盆地具有重要影响。这些特征难以用已有的盆山耦合模型解释。因此，本研究从盆地演化入手，详细分析盆山之间的关联性与独立性，以阐明“低山深盆型”盆山体系的形成过程及其耦合模式。

### 4.1 “低山深盆型”盆山体系的形成过程

前裂陷期，江汉盆地周缘山系在造山过程中，不断遭受挤压变形，并在晚侏罗世末初步成型（图 3）。尽管此时尚无江汉裂谷盆地，还未形成盆山体系，但

周缘山系对盆地基底的塑造控制了后期裂谷盆地的空间形态和结构样式 (Wu et al., 2020a)。

早白垩世, 盆区主体处于热隆升状态; 周缘山系快速冷却, 表明其遭受快速剥露 (图 4、6a; Wu et al., 2018; Ge et al., 2013; Ji et al., 2014; Shen et al., 2016)。考虑到盆区增温的影响, 周缘山系的剥露速率可能更快。因此, 早白垩世, 周缘山系处于不断剥露、变低的状态。晚白垩世, 深部地幔强烈上涌导致江汉盆地进入大规模裂陷阶段, 盆地快速沉降, 岩石圈不断变薄, 深部地幔不断加热盆地 (图 5b、6b)。此时, 周缘山系遭受剥蚀, 并向盆内输送物质。由于上白垩统厚度很大且以砾岩、砂岩为主, 所以山系的剥蚀强度应该很大。然而, 此时周缘山系处于缓慢冷却阶段 (不考虑岩体自身冷却, 图 4; Ge et al., 2013; Ji et al., 2014; Shen et al., 2012, 2016, 2020; Tian et al., 2025)。如何解释这一现象呢? 本研究认为可以用盆地传热增温来解释, 即剥露的山系被盆地加热, 故冷却速率缓慢。因此, 这里的缓慢冷却不能直接与缓慢剥露相对等。由此可以看出, 晚白垩世周缘山系处于不断剥露、变低的状态。

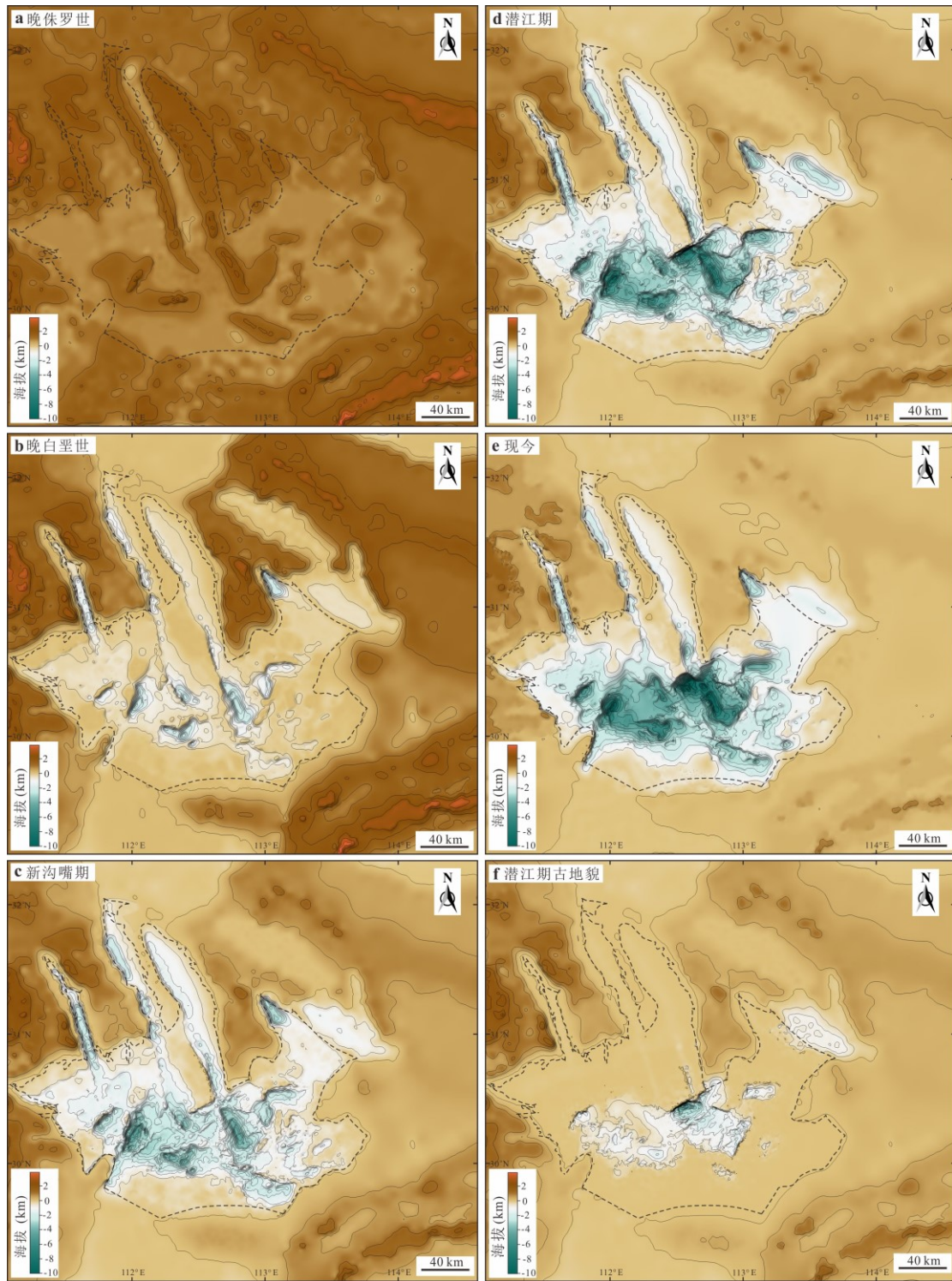


图 11 江汉盆地及周缘山系晚侏罗世以来盆深与山高演化示意图 (a-e)  
与潜江期古地貌图 (f)

Fig. 11 Evolution of basin depth and mountain elevation of the Jiangnan Basin and its surrounding mountains during the late Jurassic to present (a-e), with the paleotopography during the Qianjiang Stage (f).

周缘山系古近纪的热历史与晚白垩世相似，都处于缓慢冷却阶段（图 4；Ge

et al., 2013; Ji et al., 2014; Shen et al., 2012, 2016, 2020; Tian et al., 2025)。因此,晚白垩世的模型仍然适用于古近纪,即周缘山系在古近纪也处于不断剥露、变低的状态。可以看到,无论裂陷作用如何变化,其对山系冷却速率的影响并不大,其原因可能包括:1)裂陷作用越强,对山系的增温越明显,剥蚀量与增温量相互补偿;2)山系的剥蚀与盆地裂陷强度关系并不大,可能与自身海拔、气候等因素有关。本研究倾向于第二种解释,因为荆沙期为强烈裂陷阶段,但主要为细粒沉积,说明沉积物供应没有明显增强。裂后期,盆地开始冷却、进入热沉降阶段,而此时周缘山系处于快速冷却阶段。由于同裂陷期干/湿气候的变化并未引起冷却速率的明显变化,所以本研究认为周缘山系裂后期快速冷却的主要原因是热衰减,而不是气候变化(参考 Tian et al., 2025)。其实无论哪种解释模型,裂后期,周缘山系都处于不断剥露、变低的状态。

上述分析表明,1)晚侏罗世末,周缘山系与盆区均为褶皱冲断山系,周缘山系处于鼎盛期(海拔达到最大),并塑造了盆区的山系;2)同裂陷期,盆地不断沉降、变深,而周缘山系不断剥露、变低。基于此,本研究恢复重建了不同时期盆深与山高的对应关系示意图(图 11)。需要注意的是,南北重力梯度带以东山系的变低速率要大于以西的山系。原因在于,重力梯度带以东山系除受剥蚀作用影响外,还受区域伸展作用的影响,而后者是导致周缘山系呈现西高东低格局的主要原因。

#### 4.2 “低山深盆型”盆山体系的耦合模式

在“低山深盆型”盆山体系形成过程中,盆地越来越深,山系越来越低,说明两者存在关联关系。空间上,周缘山系塑造了江汉盆地的基底,通过前裂陷期褶皱和逆冲断裂的伸展性活化控制盆地的空间形态与结构样式,说明两者是依存关系(图 3; Wu et al., 2020a)。然而,这种依存是单方面的,主要是盆地对山系的依存。物质上,周缘山系剥掉的物质被输送到盆地,沉积物的负载作用能够增加盆地的总沉降量;然而,这种负载作用受控于断控沉积物厚度,与断层活动性正相关,因此不能将其归为山系对盆地沉降的影响。虽然盆地除了接受山系剥蚀下来的物质,还接受了深部复合物质输入,但山系对盆地的物质输入依然占据主体地位(图 10)。一些研究提出同裂陷期深部物质流动或者推挤能够引起山系的隆升,并以此体现盆对山在物质和动力上的影响(牛树银等, 1995; 徐杰等,

2001)。然而，该模型与周缘山系的热演化历史并不吻合，即同裂陷期周缘山系处于缓慢剥露状态，而裂后期，山系却快速冷却（图 4）。实际上，同裂陷期岩石圈是被拉伸减薄，而不是物质的大位移迁移所导致的减薄，深部地壳结构可以证实这一点（图 1d; Zhang et al., 2009）。如果盆地对山系产生较强的挤压作用，那么山系也会形成反作用力施加于盆地，形成挤压应力场，这与伸展背景不相符（图 10）。因此，本研究认为同裂陷期盆对山并没有规模化的深部物质补给，也不会产生规模化的挤压作用，即盆对山在物质和动力上没有影响。可以看出，传统的“三位一体”耦合模式在“低山深盆型”盆山体系中仅仅体现在“周缘山系塑盆、山系剥露填盆”（图 3）。这两方面都属于山对盆影响；那么，“低山深盆型”盆山体系中盆对山的影响是不存在，还是体现在别的方面呢？

从周缘山系热历史和 4.1 部分的分析可以看出，江汉盆地对周缘山系的影响主要体现在温度方面，即“盆地增温暖山”（图 4、12、13）。江汉盆地由于岩石圈强烈减薄而接收到更多深部的热量，导致盆地不断受热、增温；同时，裂陷期地层相对基底具有更低的岩石热导率，形成一个保温层，使盆地温度升高。由于温度差，热量由盆地传递到周缘山系，使周缘山系受热、增温（图 13）。因此，尽管周缘山系被不断剥露，其埋藏的岩体由于被加热而保持温度不变。早白垩世侵入的高温岩体在晚白垩世-古近纪早期以自身冷却为主，因此表现出快速冷却的特征（图 4、13）。既然盆地传热影响这么大，为什么“高山深盆型”盆山体系却不考虑盆地传热的影响？这是因为在挤压背景下盆地沉降过程中岩石圈处于不断增厚而非减薄的状态，盆地与造山带的温度差不像裂谷盆地那么大，传热量与山系隆升剥蚀产生的冷却量相差较远，可以忽略不计（图 12）。

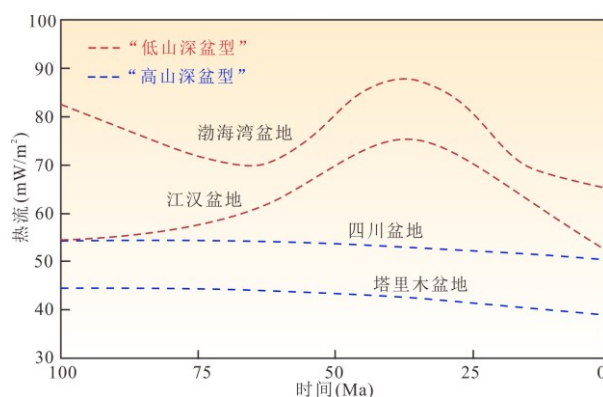


图 12 不同属性盆山体系下盆地热流史特征

Fig. 12 basin heat flow history in different basin-mountain system

数据来自袁玉松等, 2007; 李天义等, 2012; Qiu et al., 2014; 邱楠生等, 2023

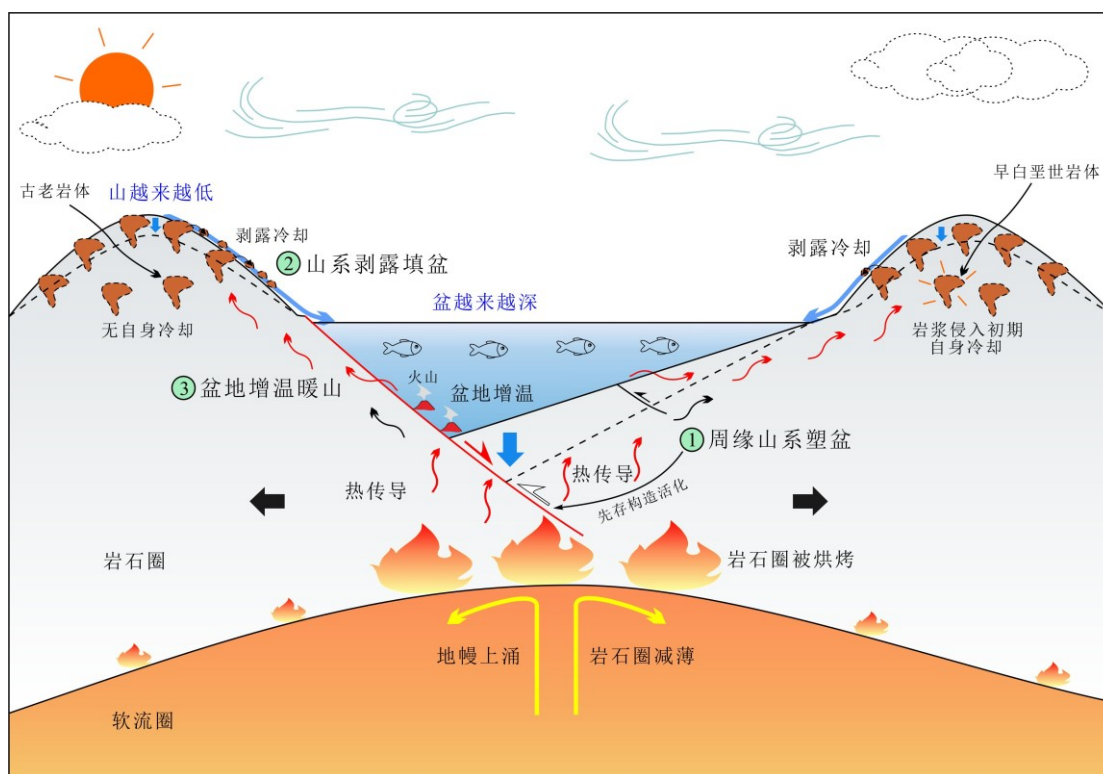


图 13 “低山深盆型”盆山体系盆山耦合模式

Fig. 13 Basin-mountain coupling model of the basin-mountain systems characterized by “low mountain, deep basin”

### 4.3 启示与意义

通过对江汉盆地及周缘山系构造演化过程的对比分析，本研究揭示了“低山深盆型”盆山体系的形成过程，并建立了新的盆山耦合模式。新模式的构建不仅深化了对江汉盆地构造演化与成盆动力学过程的理解，还阐明了盆山之间的耦合关系和相互作用过程，为破译江汉盆地沉积充填之谜提供了有力支撑。

江汉盆地的沉积充填之谜，包括 1) 强裂陷期（晚白垩世、荆沙期）不发育烃源岩，弱裂陷期（新沟嘴期、潜江期）发育烃源岩；2) 弱裂陷期，沙市期只发育盐层，而潜江期既发育盐层又发育烃源岩（图 2b；吴路路，2019；王必金等，2024）。因为湿润气候有利于富碳沉积，所以新沟嘴期虽然裂陷作用较弱，但发育了盆地重要的烃源岩，这符合传统的裂陷盆地沉积模式（王必金等，2024）。潜江期为干旱气候，不但沉积了大量蒸发岩，还发育了盆地主力烃源岩，指示盐湖环境有利于有机质保存；然而，同为干旱气候的沙市期，虽然也沉积了大量蒸发岩，却没有发育烃源岩（王必金等，2024）。结合新的盆山模式，本研究认为

主要原因在于沙市期周缘山系海拔比潜江期高，向盆地提供的物源更多，导致盆地缺乏欠补偿环境，不利于烃源岩形成。同为干旱环境，晚白垩世和荆沙期既无蒸发岩沉积又无烃源岩发育（图 2b）。这是由于这两个时期均为强烈/大规模裂陷时期，湖盆较为宽阔，不利于蒸发岩形成；没有了盐湖环境，干旱气候下难以有效保存有机质，就无法形成烃源岩层。此外，晚白垩世与荆沙期沉积粒度的“前粗后细”则指示周缘山系的海拔对盆地沉积充填的重要影响，即在其他条件一定的情况下，山系越高，剥蚀速率越大，其对盆地的物质供应就越大（朱筱敏等，2026）。从潜江期的古地貌可以看出，“低山深盆”地貌和多段、多阶盆地结构与传统的裂谷盆地源汇模式不同，是造成裂陷中晚期盆地中部物源不充足、缺少粗碎屑的重要原因（图 11f；参考朱筱敏等，2026）。以上分析表明，古气候、周缘山系的海拔与裂陷作用联合控制着盆地沉积充填，即多圈层相互作用。

新模型的构建将伸展型盆山体系与挤压型盆山体系剥离开来，不仅丰富了传统的盆山耦合理论，还能为其他伸展型盆山体系研究和油气勘探提供借鉴。例如，盆深与山高的变化，对盆地源汇系统分析具有重要意义；裂陷初期，靠近山系的凹陷易形成过补偿湖盆而不利于烃源岩的形成等。同时，新模型为周缘山系热年代学研究提供了更多地质约束和解释模型。

## 5 结论

基于野外露头、钻井与地震资料、地球化学与热年代学数据的综合分析，研究系统揭示了江汉盆地及周缘山系的构造演化过程，建立了新的盆山耦合模式。取得的主要结论如下：

1) 江汉盆地及周缘山系形成了一个典型的“低山深盆型”盆山体系。晚侏罗世以来，周缘山系经历了两期快速冷却阶段和一期缓慢冷却阶段，而江汉盆地则经历了基底挤压变形、热隆升、裂陷沉降和拗陷演化 4 个阶段。

2) 在盆地裂陷沉降过程中，驱动力来自深部软流圈地幔的流动和上涌；此时，周缘山系一直处于缓慢冷却阶段。周缘山系对盆地的物质输入虽然占据主体地位，但是盆地也接受了大量的深部复合物质输入。

3) 在江汉“低山深盆型”盆山体系形成过程中，盆地不断沉降、变深，而

周缘山系不断剥露、变低，意味着盆山之间存在关联关系。盆山之间的相互影响具有多方面（包括几何形态、物质、温度三个方面）、单方向（同一方面是单向影响）的特点，其耦合模式为“周缘山系塑盆、山系剥露填盆、盆地增温暖山”。

**致谢：**感谢两位审稿人提出的宝贵建议；感谢曾小伟博士在研究过程中的建设性意见和讨论。

## References

- Amante, C., Eakins, B.W., 2009. ETOPO1 1 Arc-minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. *NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24*. National Geophysical Data Center, NOAA. <https://doi.org/10.7289/V5C8276M>.
- Ge, X., Shen, C., Yang, Z., et al., 2013. Low-Temperature Thermochronology Constraints on the Mesozoic-Cenozoic Exhumation of the Huangling Massif in the Middle Yangtze Block, Central China. *Journal of Earth Science*, 24: 541-552. <https://doi.org/10.1007/s12583-013-0348-8>
- Guo, Z., Liu, X., Chen, H., 2007. Basin-Mountain Coupling Relationship and Oil-Gas Response in Lower Paleozoic Since the Indo-China Epoch in Jiangnan Basin. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 14(3): 49-51 (in Chinese with English abstract).
- Ji, W., Lin, W., Faure, M., et al., 2014. Origin and Tectonic Significance of the Huangling Massif Within the Yangtze Craton, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 86: 59-75. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.06.007>
- Jia, C., Yang, S., Wei, G., et al., 2008. Structural Characteristics and Petroleum-Bearing Prospects of Cenozoic Circum-Tibet Plateau Basin and Range System in China. *Natural Gas Industry*, 28(8): 1-11 (in Chinese with English abstract).
- Ju, Y., Wang, W., Reng, Z., et al., 2025. Multi-stage Evolution of the Ordos Basin: Its Coupled Basin-Mountain Systems and Energy Resources. *Science China Earth Sciences*, 68(8): 2426-2473. <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1627-1>
- Li, B., Jia, C., Pang, X., et al., 2007. The Spatial Distribution of the Foreland Thrust Tectonic Deformation in the Circum-Tibetan Plateau Basin and Range System. *Acta Geologica Sinica*, 81(9): 1200-1207 (in Chinese with English abstract).
- Li, C., 2019. Research on the Cenozoic Subsidence Evolution in the Tarim Basin and the Process of Uplift of the Tian Shan (Dissertation). Nanjing University, Nanjing (in Chinese with English abstract).

- Li, F., Wang, C., Zhu, L., et al., 2002. The Basin-Range Coupling under the Regional Compressional Regimes. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 22(4): 17-25 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., Xiao, W., Yan, Z., 2003. Basin-Range Coupling and Its Sedimentation. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(1): 52-60 (in Chinese with English abstract).
- Li, T., He, S., He, Z., et al., 2012. Reconstruction of tectonic uplift and thermal history since Mesozoic in the Dangyang synclinorium of the central Yangtze area. *Acta Petrologica Sinica*, 33(2): 213-224 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., 1998. On Coupling Relationships Between Longmenshan Foreland Basin and Longmenshan Orogenic Belt. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 17(2): 10-14 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Song, T., Wang, Z., et al., 2021. Strike Variation Evolution of the Basin-Mountain System in Western Sichuan Longmenshan as Recorded by Deformation, Exhumation and Deposition and Discussion on the Period of Key Structural Transformation. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 48(3): 257-282 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Ma, C., Ying, D., et al., 2014. Tectonic Dynamic Evolution and Analysis of Basin-Range Coupling and Basin-Mountain Coupling in Sichuan-Chongqing Region, China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 631-640 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C., Yu, X., Yuan, X., et al., 2021. Characteristics, Distribution Regularity and Formation Model of Brine-Type Li Deposits in Salt Lakes in the World. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2009-2029 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D., Li, D., 2002. The Coupling Relationship Between the Orogens and the Sedimentary Basins: An Example from Qinghai-Tibet Plateau and Its Surrounding Basins. *Northwestern Geology*, 35(1): 15-21 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H., Liang, H., Li, X., et al., 2000a. The Coupling Mechanisms of Mesozoic-Cenozoic Rift Basins and Extensional Mountain System in Eastern China. *Earth Science Frontiers*, 7(4): 477-486 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H., Wang, Z., Xiong, B., et al., 2000b. Coupling Analysis of Mesozoic-Cenozoic Foreland Basin and Mountain System in Central and Western China. *Earth Science Frontiers*, 7(3): 55-72 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S., Luo, Z., Dai, S., 1995. The Uplift of the Longmenshan Thrust Belt and Subsidence of the Western Sichuan Foreland Basin. *Acta Geologica Sinica*, 69(3): 204-214 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S., Zhang, G., 2005. Fundamental Ideas, Contents and Methods in Study of Basin and Mountain Relationships. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 101-111 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Z., Qu, G., Li, T., et al., 2008. Tectonic Coupling and Segmentation of Marginal Structural

- Belt in Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 29(3): 271-277 (in Chinese with English abstract).
- Niu, S., Shao, J., Sun, A., et al., 2006. Coupling Relationship Between Basin-Mountain and Nedogenic Mineralization in the Eastern Part of North China. *Geotectonica et Metallogenia*, 30(3): 331-342 (in Chinese with English abstract).
- Niu, S., Sun, A., Bai, W., 1995. Lateral Migration of the Lithospheric Material Between Orogenic Zones and Adjacent Basins. *Earth Science Frontiers*, 2(1): 85-92 (in Chinese with English abstract).
- Peng, T., Wang, Y., Fan, W., et al., 2006.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  Geochronology and Geochemistry of the Early Tertiary Basaltic Rocks in the Jiangnan Basin, China and Its petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1617-1626 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, N., Chang, J., Feng, Q., et al., 2023. Maturation history of deep and ultra-deep source rocks, central and western basins, China. *Earth Science Frontiers*, 30(6): 199-212 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, N., Zuo, Y., Chang, J., et al., 2014. Geothermal evidence of Meso-Cenozoic lithosphere thinning in the Jiyang sub-basin, Bohai Bay Basin, eastern North China Craton. *Gondwana Research*, 26(3-4): 1079-1092.
- Shen, C., Hu, D., Min, K., et al., 2020. Post-Orogenic Tectonic Evolution of the Jiangnan-Xuefeng Orogenic Belt: Insights from Multiple Geochronometric Dating of the Mufushan Massif, South China. *Journal of Earth Science*, 31(5): 905-918. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1346-2>
- Shen, C., Hu, d., Shao, C., et al., 2018. Thermochronology Quantifying Exhumation History of the Wudang Complex in the South Qinling Orogenic Belt, Central China. *Geological Magazine*, 155(4): 893-906. <http://dx.doi.org/10.1017/S0016756816001047>
- Shen, C., Mei, L., Min, K., et al., 2012. Multi-Chronometric Dating of the Huarong Granitoids from the Middle Yangtze Craton: Implications for the Tectonic Evolution of Eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 52: 73-87. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.02.013>
- Shen, C., Mei, L., Xu, Z., et al., 2007. Architecture and Tectonic Evolution of Composite Basin-Mountain System in Sichuan Basin and Its Adjacent Areas. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(3): 288-299 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L., Zhou, X., Deng, P., et al., 2004. Geological Features and Tectonic Volution of Meso-Cenozoic Basins in Southeastern China. *Geological Bulletin of China*, 23(9): 876-884 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Li, Z., He, C., et al., 2025. Characteristics of Connected Pores and Evaluation of Shale Oil Mobility in the Qianjiang Formation, Qianjiang Sag, Jiangnan Basin, China. *Journal of Earth Science*, 36(4): 1591-1604.
- Tang, L., Qiu, H., Yun, L., et al., 2012. Analysis of Basin-Mountain Coupling and Transition of the Northern Tarim Basin-Southern Tianshan Orogenic Belt. *Earth Science Frontiers*, 19(5):

- 195-204 (in Chinese with English abstract).
- Tian, Y., Li, B., Zhong, H., et al., 2025. A Method for Reconstructing Denudation Histories From Big Global Thermo-chronologic Data, Tested on the Dabie Orogen, Eastern China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130: e2024J-e29044J. <https://doi.org/10.1029/2024JB029044>
- Wang, B., Bao, H., Wu, S., et al., 2024. New Field, New Types and Resource Potentials of Oil-Gas Exploration in Jiangnan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 45(1): 133-146 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D., Mei, L., Liu, Y., et al., 2018. Mesozoic-Cenozoic Episodic Subsidence and Migration of Jiangnan Basin in Extensional Composite Basin-Mountain System. *Earth Science*, 43(11): 4180-4192 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Cong, B., Ma, L., 1997. The Tectonic Coupling of the Dabie Orogenic Belt and Hefei Basin. *Chinese Science Bulletin*, 42(6): 575-580.
- Wang, Q., Li, Z., 2003. Basin-Orogen Coupling and Origin of Sedimentary Basins. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(1): 24-30 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C., Du, Y., Mei, L., et al., 2006. Composite Basin and Range System and Reformation of Basin Prototype in Indosinian-Yanshanian in South China. *Oil & Gas Geology*, 27(3): 305-315 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G., 1998. A Tectonic Outlook of Mobilism on Basin Study. *Experimental Petroleum Geology*, 20(4): 309-318 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G., Ma, L., 2004. Orogeny and Coupled/Decoupled Basin Development: A Review. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(1): 81-97 (in Chinese with English abstract).
- Wu, H., Zhuo, Q., Liu, S., et al., 2024. Ultra-Deep Tectonic Evolution and Hydrocarbon Accumulation Process in the Lower Play of Sikeshu Sag, Southern Junggar Basin, Western China. *Acta Geologica Sinica*, 98(7): 2216-2232 (in Chinese with English abstract).
- Wu, L., 2019. The Initiation, Evolution and Abandonment of the Jiangnan Basin: Combined Influence of Basement Structures and Mantle Dynamics (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Wu, L., Mei, L., Liu, Y., et al., 2018. The Stratigraphic and Structural Record of the Cretaceous Jiangnan Basin, Central China: Implications for Initial Rifting Processes and Geodynamics. *Cretaceous Research*, 90: 21-39. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2018.03.028>.
- Wu, L., Mei, L., Paton, D. A., et al., 2020a. Basement Structures Have Crucial Influence on Rift Development: Insights from the Jiangnan Basin, Central China. *Tectonics*, 39(2): e2019TC005671. 71. <https://doi.org/10.1029/2019TC005671>
- Wu, L., Mei, L., Paton, D. A., et al., 2020b. Late Cretaceous-Cenozoic Intraplate Extension and Tectonic Transitions in Eastern China: Implications for Intraplate Geodynamic Origin. *Marine and Petroleum Geology*, 117: 104379. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104379>

- Wu, L., Yang, H., Zhang, Y., et al., 2023. Structural Coupling Between the Qaidam Basin and Bordering Orogenic Belts in the Cenozoic. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 2939-2955 (in Chinese with English abstract).
- Wu, W., Li, Q., Pei, J., et al., 2025. Seismic sedimentology, facies analyses, and high-quality reservoir predictions in fan deltas: A case study of the Triassic Baikouquan Formation on the western slope of the Mahu Sag in China's Junggar Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 120: 104546.
- Xiang, X., Chen, H., Chen, L., 2024. Plume-Modified Lithosphere Mantle Controlled the Cenozoic Sediment Thickness in the Tarim Basin. *Geophysical Research Letters*, 51: e2023GL106203. <https://doi.org/10.1029/2023GL106203>
- Xiao, A., Wei, G., Shen, Z., et al., 2011. Basin-Mountain System and Tectonic Coupling Between Yangtze Block and South Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 601-611 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Gao, Z., Sun, J., et al., 2001. A Preliminary Study of the Coupling Relationship Between Basin and Mountain in Extensional Environments: A Case Study of the Bohai Bay Basin and Taihang Mountain. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 165-174 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X., Xu, Q., 1996. Current Aspects of Basin-Mountain Transformation and Basin Analysis. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 16(2): 24-33 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z., Yang, X., Neng, Y., 2024. Layered Structural Deformation Characteristics of Kuqa foreland Thrust Belt. *Xinjiang Petroleum Geology*, 45(5): 505-515 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, Y., Zhu, C., Hu, S., 2007. Heat flow history, tectono-sedimentary evolution and thermal events of the Jiangnan Basin. *Progress in Geophysics*, 22(3): 934-939 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Ma, Z., Reng, W., 2004. Thinking of the Present Research of Basin-Mountain Coupling. *Petroleum Geology & Experiment*, 26(2): 169-175 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Zeng, L., Zhang R., et al., 2025. Control of Differential Tectonic Evolution on Tectonic Fractures in Different Tectonic Segments of Tight Gas Sandstone Reservoirs: Upper Triassic Xujiahe Formation, Western Sichuan Foreland Basin. *Journal of Earth Science*, 36(5): 2161-2178.
- Zhang, Z., Bai, Z., Mooney, W., et al., 2009. Crustal Structure Across the Three Gorges Area of the Yangtze Platform, Central China, from Seismic Refraction/Wide-Angle Reflection Data. *Tectonophysics*, 475: 423-437.
- Zhao, L., Liu, Y., Li, D., et al., 2024. Development and Prospects of Seismic Techniques for the Piedmont in Southwestern Tarim Basin. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 63(2): 265-278 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X., Liu, Q., Tan, M., et al., 2026. Research Frontier and Development of Source to Sink Systems. *Journal of Palaeogeography*, 28(1): 25-43 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 郭战峰, 刘新民, 陈红, 2007. 江汉平原印支期以来的盆山耦合关系及下古生界油气响应. 油气地质与采收率, 14(3): 49-51.
- 贾承造, 杨树锋, 魏国齐, 等, 2008. 中国环青藏高原新生代巨型盆山体系构造特征与含油气前景. 天然气工业, 28(8): 1-11.
- 琚宜文, 王巍, 任战利, 等, 2025. 鄂尔多斯盆地的多阶段演化: 盆山耦合系统和能源资源. 中国科学: 地球科学, 55(8): 2537-2582.
- 李本亮, 贾承造, 庞雄奇, 等, 2007. 环青藏高原盆山体系内前陆冲断构造变形的空间变化规律. 地质学报, 81(9): 1200-1207.
- 李超, 2019. 塔里木盆地新生代沉降及天山隆升过程研究 (博士学位论文). 南京: 南京大学.
- 李奋其, 王成善, 朱利东, 等, 2002. 区域挤压体制下盆-山耦合关系探讨. 沉积与特提斯地质, 22(4): 17-25.
- 李继亮, 肖文交, 闫臻, 2003. 盆山耦合与沉积作用. 沉积学报, 21(1): 52-60.
- 李天义, 何生, 何治亮, 等, 2012. 中扬子地区当阳复向斜中生代以来的构造抬升和热史重建. 石油学报, 33(2): 213-224.
- 李勇, 1998. 论龙门山前陆盆地与龙门山造山带的耦合关系. 矿物岩石地球化学通报, 17(2): 10-14.
- 李智武, 宋天慧, 王自剑, 等, 2021. 川西-龙门山盆山系统走向差异演化的变形、隆升和沉积记录及关键构造变革期讨论. 成都理工大学学报(自然科学版), 48(3): 257-282.
- 李忠权, 麻成斗, 应丹琳, 等, 2014. 川渝地区构造动力学演化与盆岭-盆山耦合构造分析. 岩石学报, 30(3): 631-640.
- 刘成林, 余小灿, 袁学银, 等, 2021. 世界盐湖卤水型锂矿特征、分布规律与成矿动力模型. 地质学报, 95(7): 2009-2029.
- 刘德民, 李德威, 2002. 造山带与沉积盆地的耦合—以青藏高原周边造山带与盆地为例. 西北地质, 35(1): 15-21.
- 刘和甫, 梁慧社, 李晓清, 等, 2000a. 中国东部中生代裂陷盆地与伸展山岭耦合机制. 地学前缘, 7(4): 477-486.
- 刘和甫, 汪泽成, 熊保贤, 等, 2000b. 中国中西部中、新生代前陆盆地与挤压造山带耦合分析. 地学前缘, 7(3): 55-72.
- 刘少峰, 张国伟, 2005. 盆山关系研究的基本思路, 内容和方法. 地学前缘, 12(3): 101-111.
- 刘树根, 罗志立, 戴苏兰, 1995. 龙门山冲断带的隆升和川西前陆盆地的沉降. 地质学报, 69(3): 204-214.
- 马宗晋, 曲国胜, 李涛, 等, 2008. 准噶尔盆地盆山构造耦合与分段性. 新疆石油地质, 29(3): 271-277.
- 牛树银, 邵济安, 孙爱群, 等, 2006. 华北东部盆山耦合与内生成矿作用. 大地构造与成矿学, 30(3): 331-342.
- 牛树银, 孙爱群, 白文吉, 1995. 造山带与相邻盆地间物质的横向迁移. 地学前缘, 2(1): 85-92.

- 彭头平, 王岳军, 范蔚茗, 等, 2006. 江汉盆地早第三纪玄武质岩石<sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar年代学和地球化学特征及其成因意义. 岩石学报, 22(6): 1617-1626.
- 邱楠生, 常健, 冯乾乾, 等, 2023. 我国中西部盆地深层超深层烃源岩热演化研究. 地学前缘, 30(6): 199-212.
- 沈传波, 梅廉夫, 徐振平, 等, 2007. 四川盆地复合盆山体系的结构构造和演化[J]. 大地构造与成矿学, 31(3): 288-299.
- 舒良树, 周新民, 邓平, 等, 2004. 中国东南部中, 新生代盆地特征与构造演化. 地质通报, 23(9): 876-884.
- 汤良杰, 邱海峻, 云露, 等, 2012. 塔里木盆地北缘—南天山造山带盆-山耦合和构造转换. 地学前缘, 19(5): 195-204.
- 王必金, 包汉勇, 吴世强, 等, 2024. 江汉盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力. 石油学报, 45(1): 133-146.
- 王德良, 梅廉夫, 刘云生, 等, 2018. 伸展型复合盆山体系下江汉盆地中, 新生代幕式沉降与迁移. 地球科学, 43(11): 4180-4192.
- 王清晨, 从柏林, 马力, 1997. 大别山造山带与合肥盆地的构造耦合. 科学通报, 42(6): 575-580.
- 王清晨, 李忠, 2003. 盆山耦合与沉积盆地成因. 沉积学报, 21(1): 24-30.
- 吴冲龙, 杜远生, 梅廉夫, 等, 2006. 中国南方印支—燕山期复合盆山体系与盆地原型改造[J]. 石油与天然气地质, 27(3): 305-315.
- 吴根耀, 1998. 盆地研究的活动论构造观. 石油实验地质, 20(4): 309-318.
- 吴根耀, 马力, 2004. 盆山耦合和脱耦: 进展, 现状和努力方向. 大地构造与成矿学, 28(1): 81-97.
- 吴海, 卓勤功, 柳少波, 等, 2024. 准噶尔盆地南缘四棵树凹陷超深层构造演化与油气成藏过程. 地质学报, 98(7): 2216-2232.
- 吴磊, 杨惠童, 张永庶, 等, 2023. 新生代柴达木盆地与周缘造山带的构造耦合. 地质学报, 97(9): 2939-2955.
- 吴路路, 2019. 江汉盆地的开始、演化与夭折: 基底构造与地幔动力的共同制约 (博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 肖安成, 魏国齐, 沈中延, 等, 2011. 扬子地块与南秦岭造山带的盆山系统与构造耦合. 岩石学报, 27(3): 601-611.
- 徐杰, 高战武, 孙建宝, 等, 2001. 区域伸展体制下盆-山构造耦合关系的探讨—以渤海湾盆地和太行山为例. 地质学报, 75(2): 165-174.
- 徐振平, 杨宪彰, 能源, 等, 2024. 库车前陆冲断带构造分层变形特征. 新疆石油地质, 45(5): 505-515.
- 许效松, 徐强, 1996. 盆山转换和当代盆地分析中的新问题. 沉积与特提斯地质, 16(2): 24-33.
- 袁玉松, 朱传庆, 胡圣标, 2007. 江汉盆地热流史、沉积构造演化与热事件. 地球物理学进展, 22(3): 934-939.
- 张进, 马宗晋, 任文军, 2004. 对盆山耦合研究的新看法. 石油实验地质, 26(2): 169-175.

赵邦六, 刘依谋, 李大军, 等, 2024. 塔里木盆地塔西南山前带地震技术攻关进展及发展方向. 石油物探, 63(2): 265-278.

朱筱敏, 刘强虎, 谈明轩, 等, 2026. 源汇系统: 研究关注热点和发展趋势. 古地理学报, 28(1): 25-43.

## 作者贡献度:

概念化: 吴路路、沈传波、梅廉夫

数据收集与分析: 吴路路、郭丽彬、沈雷

基金资助: 梅廉夫、吴路路、沈传波

方法与模型: 吴路路、刘昭茜、张朋

撰写初稿: 吴路路、范宇辰、刘昭茜