

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.394>



中国板块构造格局在早古生代末的重大转变

黄少英¹, 谢会文¹, 侯贵廷^{2*}, 杨宪彰¹, 罗彩明¹, 张昊², 仲子奇², 夏金凯²,
李祥², 常海宁²

1. 塔里木油田勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000
2. 造山带与地壳演化重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

摘要: 板块构造格局是大地构造的基础科学问题, 涉及到大尺度的盆山关系, 控制了洋陆格局、造山带和盆地的形成与演化, 因而可以用来揭示大洋关闭、造山隆升的过程。早古生代末是中国 3 个板块的构造格局发生重大转变的关键时期。基于高置信度遴选的古地磁数据和全球古地磁数据库, 结合大地构造比较学的地质亲缘性对比分析, 利用 GPlate 软件重建了晚前寒武纪至早古生代的全球板块构造格局, 提出奥陶纪末—志留纪是中国 3 个板块格局发生重大转变的关键时期, 440 Ma 之前, 中国 3 个板块的空间格局是 N-S/T 格局 (即华北在西、华南在东北, 塔里木在东南), 440 Ma 后中国 3 个板块的空间格局转为 T-N/S 格局 (即塔里木在西、华北在东北, 华南在东南), 并一直持续到现今中国 3 个板块的格局。这个重大转变与晚前寒武纪罗迪尼亚超大陆的裂解和早古生代末中国 3 个板块之间的洋陆格局变迁密切相关, 是从伸展的大地构造环境向缩短的大地构造环境转变的结果。

关键词: 塔里木板块; 华北板块; 华南板块; 古纬度变迁; 地质亲缘性; 构造地质学。

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2023)04-1321-09

收稿日期: 2022-05-18

Key Transition of Chinese Plate Configuration at the End of Early Paleozoic

Huang Shaoying¹, Xie Huiwen¹, Hou Guiting^{2*}, Yang Xianzhang¹, Luo Caiming¹, Zhang Hao², Zhong Ziqi²,
Xia Jinkai², Li Xiang², Chang Haining²

1. Institute of Petroleum Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China

2. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: The plate configuration is the basic geological question in the tectonics, which considers the large scale basin-orogen relationship, and controls the configuration of oceans and continents, origin and evolution of basin-range provinces, and has also been applied to uncover the close of ocean and uplift of mountains. The end of Early Paleozoic is the key transition period of Chinese three plates. Based on the global high coefficient paleomagnetic data and tectonic comparison in geological affiliation, the global configuration in the Late Precambrian to Early Paleozoic is reconstructed by GPlate software, the Ordovician-Silurian is the key transition period of Chinese three plates. Before 440 Ma, the configuration of Chinese three plates is N-S/T style (North China

基金项目: 塔里木油田分公司基础地质研究课题 (No. 041019120067).

作者简介: 黄少英 (1977—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事盆地基础地质研究. ORCID: 0000-0002-0274-616X. E-mail: huangsy-tlm@petrochina.com

* **通讯作者:** 侯贵廷, ORCID: 0000-0002-8395-2247. E-mail: gthou@pku.edu.cn

引用格式: 黄少英, 谢会文, 侯贵廷, 杨宪彰, 罗彩明, 张昊, 仲子奇, 夏金凯, 李祥, 常海宁, 2023. 中国板块构造格局在早古生代末的重大转变. 地球科学, 48(4): 1321-1329.

Citation: Huang Shaoying, Xie Huiwen, Hou Guiting, Yang Xianzhang, Luo Caiming, Zhang Hao, Zhong Ziqi, Xia Jinkai, Li Xiang, Chang Haining, 2023. Key Transition of Chinese Plate Configuration at the End of Early Paleozoic. *Earth Science*, 48(4): 1321-1329.

lies in the west, South China lies in the northeast, Tarim lies in the southeast). After 440 Ma, the configuration is transformed into a T-N/S style (Tarim lies in the west, North China lies in the northeast, South China lies in the southeast) that maintains. The key transition is related to the breakup of the Late Precambrian Rodinian supercontinent and the change of ocean-continent configuration of Chinese three plates in the Early Paleozoic, the transition is from extension to compression in tectonic setting.

Key words: Tarim; North China; South China; change of paleo-latitude; geological affinity; structural geology.

板块构造格局的演化是盆山关系研究的大地构造背景基础地质问题. 在板块构造格局的演化过程中, 通过大洋关闭、板块碰撞和地体拼贴导致板块或地体之间形成造山带并影响了板内或板缘的盆地形成与演化. 板块构造的演化过程可以揭示大洋关闭造山隆升的过程, 也控制了地球最大尺度的洋陆格局和盆山演化, 包括洋盆的开启与闭合以及造山带的形成与演化.

在过去几十年, 东亚是全球板块构造古地理重建分析最具争议的地区之一 (Chen *et al.*, 2004; Zhan *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2019). 尤其中国的 3 个板块 (塔里木、华北和华南) 在全球板块构造演化过程中的位置和大地构造意义前人关注不够, 有些模式把中国的板块放在从属地位, 这些都需要重新审视和厘定. 最早的全球板块运动模型是 1968 年由 Le Pichon 提出来的, 此后, 随着观测资料的积累和研究工作的深入, DeMets 和 Gordon 建立了基于 PLATE Project model 的板块运动模型 (DeMets *et al.*, 1994; Scotese, 1997). 但国外学者重点研究世界上的大型板块, 例如北美板块、波罗的板块、西伯利亚板块、印度板块、非洲板块、澳大利亚板块和南美板块, 由于我国 3 个板块较

小, 作为从属次要的板块, 研究者对其重视程度不够 (Blakey, 2008). 近些年, 虽然国内外随着中国 3 个板块古地磁数据的积累和研究, 中国 3 个板块在全球板块构造格局重建中越来越受到重视 (Chen *et al.*, 2004; Zhan *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2008; Hou *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2009, 2013, 2019; 张克信等, 2015; Zhao *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2018; Young *et al.*, 2019), 但仍有一些问题没有解决, 例如中国 3 个板块 (塔里木、华北和华南) 现在的空间格局是塔里木 (简称 T) 位于中国西部、而位于东部的两个板块北为华北 (简称 N)、南为华南 (简称 S), 这个格局本文用 T-N/S 表达. 在全球板块构造演化的整个地质历史时期, 中国 3 个板块的格局一直都是 T-N/S 格局吗?

1 建立震旦纪末—早古生代全球板块构造演化格局

目前全球板块构造格局演化图大多数是基于全球古地磁数据库利用 GPlate 软件进行重建的, 但都是以国外大型板块为优先的核心板块, 对中国 3 个板块重视不够. 中国的 3 个板块应该依据高置信度的古地磁数据来约束, 基于比较大地构造学的地

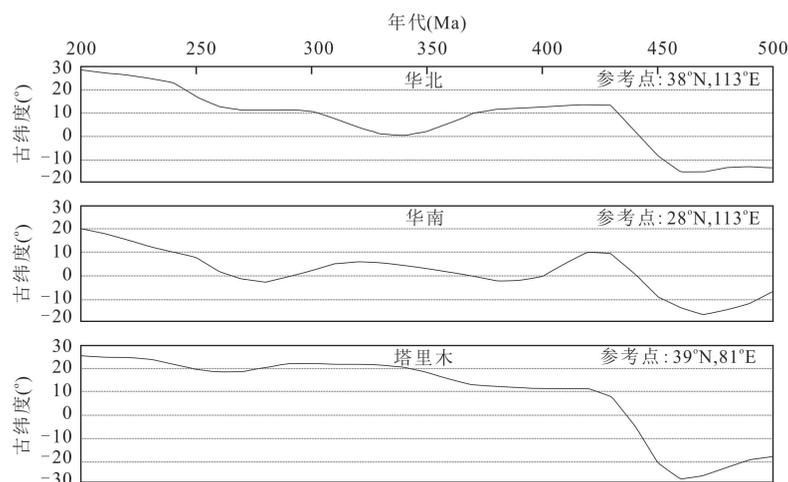


图 1 中国 3 大板块的古纬度变迁轨迹 (据 Huang *et al.*, 2018 略改)

Fig.1 Wandering paths of paleo-latitude of Chinese three plates (after Huang *et al.*, 2018, slightly modified)

质亲缘性对比分析,在纬线上可以适当调整中国 3 个板块的位置.但又不能随意调整位置,还要考虑到板块之间的空间牵制约束,所以要遵循板块构造演化轨迹的顺畅合理性.

黄宝春等(2008)根据华北板块、华南板块和塔里木板块及东亚东南亚其他地体或地块的高置信度古地磁数据(可靠性指数 $Q \geq 4$),按时代进行平均并获得了中国 3 个板块的古纬度迁移轨迹图(图 1),为进一步分析中国 3 个板块空间格局的演化奠定了

坚实的基础.

基于 Huang *et al.* (2018)经高置信度遴选的中国 3 个板块(华北、华南、塔里木)和东南亚各地块的古地磁数据(图 1),并从全球古地磁数据库获得世界其他板块的古地磁数据,本文利用 GPlate 软件恢复重建了震旦纪末—早古生代全球板块构造演化图(图 2b),并基于主要板块之间的地质亲缘性对比,适当调整某些板块在纬线上的位置,以协调各板块之间的大地构造空间格局.

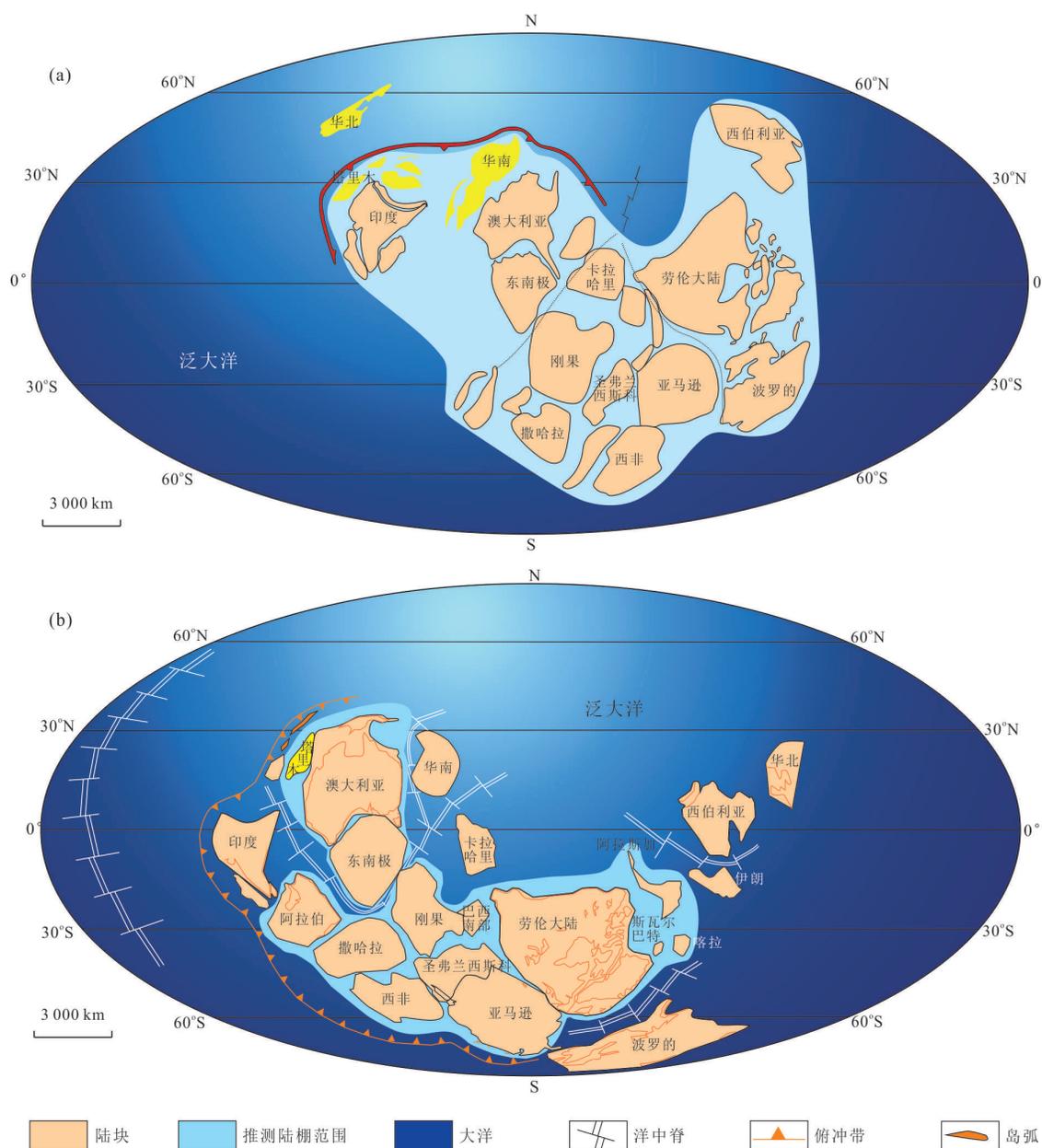


图 2 南华纪罗迪尼亚超大陆的裂解模式

Fig.2 Model for breakup of the Rodinian supercontinent in Nanhua Period

a. 华北板块位于超大陆西侧,塔里木板块靠近印度板块(Zhao *et al.*, 2018); b. 华北板块游离于超大陆以东,塔里木板块靠近澳大利亚板块(本文)

在震旦纪—早古生代,除了华北板块和塔里木板块的位置争议较大以外,其他板块的位置相对争议较小.前寒武纪—早古生代华北板块是一直位于罗迪尼亚超大陆的西侧还是游离于罗迪尼亚超大陆以东?塔里木板块在晚前寒武纪是靠近澳大利亚板块还是靠近印度板块?

通过各板块的构造热事件对比分析,前寒武纪华北板块与西伯利亚板块、波罗的板块和劳伦古陆在构造热事件频次和发育程度方面地质亲缘性更强(图3),而塔里木板块和华南板块与印度板块在中古元古代18~9亿年间均缺乏构造热事件亲缘性,而在晚前寒武纪6~9亿年间塔里木板块和华南板块与澳大利亚板块在构造热事件频次和发育程度上亲缘性更强(图3).基于以上大地构造比较学研究,华北板块与西伯利亚和波罗的更亲缘,因此在晚前寒武纪华北板块应该更靠近西伯利亚和波罗的板块,应该位于罗迪尼亚超大陆以东(图2b),而不是靠近塔里木印度板块一起位于罗迪尼亚超大陆西侧(图2a).

虽然早前寒武纪塔里木和华南板块与印度板块较亲缘,但晚前寒武纪塔里木和华南板块明显与澳大利亚板块更亲缘,三者在此9~6亿年间均为先弱伸展后强伸展(图3中三者该时期从灰条码至黑条码)的特点,而该时期印度板块为先强伸展后弱伸展(图3中该时期印度从黑条码至灰条码)的特点,因此晚前寒武纪(南华纪—震旦纪)塔里木板块不应该与印度板块在一起,而应该靠近澳大利亚板块(图3).Zhao *et al.*(2018)的模型(图2a)由于没有考虑板块的地质亲缘性对比结果,将华北板块远离与其亲缘性很强的西伯利亚板块是有待商榷的.依据亲缘性对比,本文将南华纪时期相互亲缘性强的华北板块在相同纬度线上东移靠近西伯利亚板块,而塔里木板块和华南板块在南华纪时期与澳大利亚板块亲缘性较强,因此两个板块靠近澳大利亚板块,这不同于Zhao *et al.*(2018)将塔里木板块靠近印度板块的模式(图2a,图2b).

晚前寒武纪时期的南华纪—震旦纪是罗迪尼亚超大陆裂解的关键时期(张克信等,2015;Chen *et al.*,2019;Yang *et al.*,2022a),主要表现为华北与西伯利亚、劳伦和波罗的向东漂移,与其他板块(包括澳大利亚、华南、塔里木、印度和东南极等)分离,导致罗迪尼亚超大陆裂解(图2).从震旦纪—寒武纪至奥陶纪,华北板块随着劳伦、波罗的和西伯

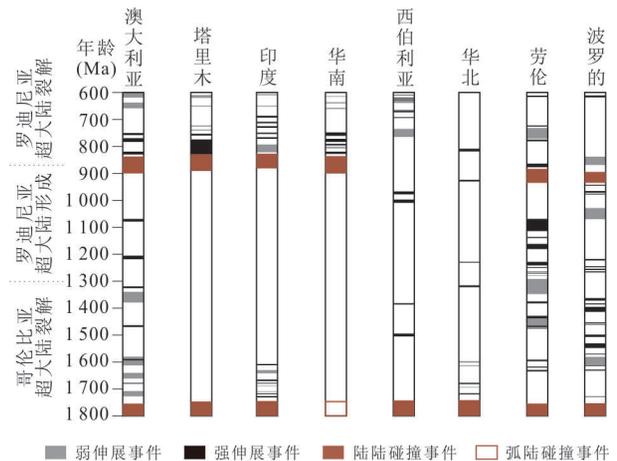


图3 中国3个板块与世界主要板块的构造事件亲缘性对比(在Li *et al.*, 2018基础上补充修改)

Fig.3 Comparison among the tectonic event affinities in the Chinese three plates and major plates in the world

利亚持续向东漂移(图4a),逐渐从东半球经地球另一侧漂移到西半球(图4b,图4c).华北板块由晚前寒武纪位于冈瓦纳古陆以东转到寒武纪—奥陶纪位于冈瓦纳古陆以西,介于劳伦—西伯利亚—波罗的与塔里木—澳大利亚—印度之间,而塔里木和海南介于华北与澳大利亚—印度之间(图4b,图4c).

2 志留纪末全球板块构造演化中的中国3个板块空间格局的转变

基于Huang *et al.*(2018)高置信度遴选的中国3个板块古地磁数据分析,奥陶纪末华北板块位于北纬3°,华南板块位于北纬2°,塔里木板块位于南纬5°,华北板块从震旦纪末位于冈瓦纳古陆以东,经寒武纪至奥陶纪已经从地球的另一侧转到冈瓦纳古陆以西,介于劳伦—波罗的—西伯利亚与华南和塔里木之间.结合本文在上一节对晚前寒武纪—早古生代中国3个板块空间格局的演化过程分析,中国3个板块的空间关系在寒武纪和奥陶纪都是N-S/T格局,即华北(简称N)在西、华南(简称S)在东北、塔里木(简称T)在东南的格局(图4b,图4c).

虽然塔里木与冈瓦纳古陆西部的澳大利亚和印度之间存在一个原特提斯洋,但奥陶纪末中昆仑岛弧拼贴到塔里木西南缘导致库地洋关闭,同时阿尔金—祁连岛弧也拼贴到塔里木东南缘导致北阿尔金洋关闭(方爱民等,2010;李松彬等,2013;张克信等,2015;张建新等,2015;陈永权等,2015)(图

4b, 图 4c). 此时的塔里木和华南仍然是在冈瓦纳古陆周缘与古陆若即若离的小陆块, 尚未彻底从冈瓦纳古陆脱离漂移走. 塔里木北缘转为主动陆缘了, 南天山洋开始出现向塔里木的俯冲, 南天山洋发生双向俯冲, 开始缩小(郭瑞清等, 2013; 张克信等, 2015; 高华华等, 2016; Han and Zhao, 2018)(图 4c). 奥陶纪末整个全球板块格局在东半球仍延续寒武纪以来以冈瓦纳古陆为主体的格局, 周缘围绕着塔里木和华南等小陆块, 而西半球是劳伦古陆、西伯利亚和波罗的等板块仍处于零散漂移阶段, 周缘仍以被动陆缘为主(图 4b, 图 4c).

依据古地磁数据建立起来的塔里木板块与澳大利亚板块的古纬度变迁曲线(黄宝春等 2008; 王洪浩等, 2013; Wen *et al.*, 2017)(图 5)分析, 塔里木与澳大利亚的古纬度从南华纪至奥陶纪末(8.5~4.4 亿年)一直是很相近的, 说明该时期两个板块的运动是协调一致的, 同属于同一个古陆, 即冈瓦纳古陆的一部分, 但在奥陶纪末(440 Ma)以后, 进入志留纪开始, 塔里木板块与澳大利亚板块分道扬镳, 塔里木板块向北漂移, 而澳大利亚板块与冈瓦纳古陆一起向南漂移(图 6). 图 6 是本文基于中国 3 个板块的高置信度遴选的古地磁数据利用 GPlate 软件重建的志留纪末全球板块构造格局图.

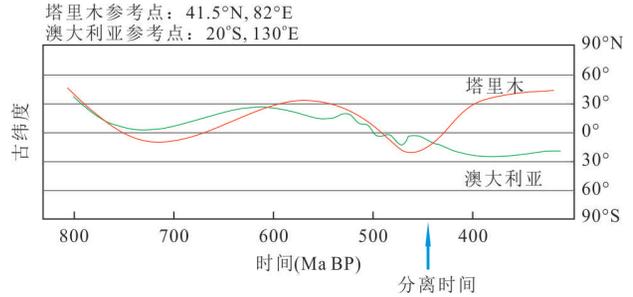


图 5 塔里木板块与澳大利亚板块的古纬度变迁曲线
Fig.5 Paths of paleo-latitude evolution for Tarim plate and Australia plate

黄宝春等, 2008; 王洪浩等, 2013

从寒武纪至奥陶纪末, 华北板块与劳伦古陆、西伯利亚和波罗的一起向东漂移, 一直位于华南和塔里木板块以西(图 4a~4c). 寒武纪末, 一直向东漂移的华北终于与华南碰撞形成了商丹缝合线(Zhao *et al.*, 2018)(图 4b). 奥陶纪末华北与华南又处于分开状态, 一直持续到志留纪末, 两者之间为古秦岭洋, 即勉略洋(Zhao *et al.*, 2018)(图 4c, 图 6). 志留纪末, 华北板块位于北纬 13°, 华南板块位于北纬 6°, 塔里木板块位于北纬 11°, 中国 3 个板块基本上都处于低纬度带(图 6). 但与上一期的奥陶纪末格局对比, 最大的不同是塔里木板块从南半球与冈瓦纳古

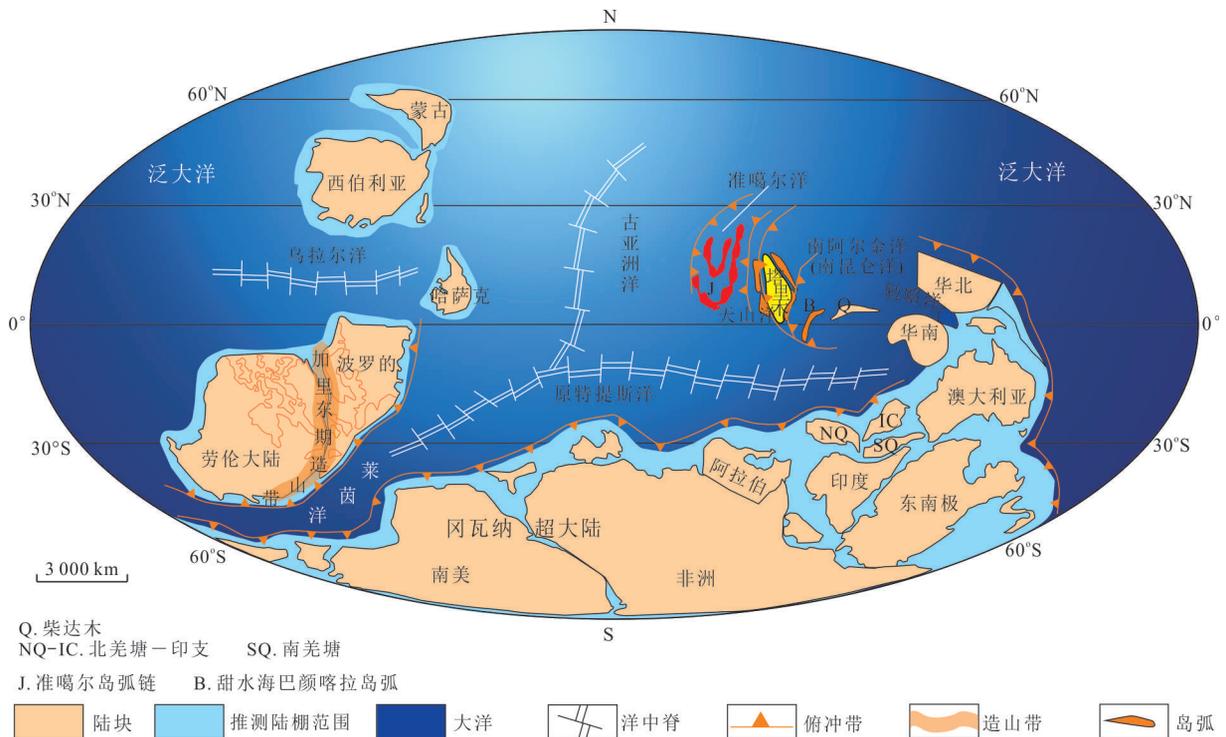


图 6 志留纪末全球板块构造中的中国 3 个板块的 T-N/S 格局

Fig. 6 T-N/S style of Chinese three plates in the global configuration at end of Silurian Period

陆快速脱离,向北半球漂移,而华北和华南继续向东漂移,3个板块古纬度的变化和漂移轨迹表明志留纪是东亚各板块格局大变革的时期.塔里木板块向西北方向漂移,同时华北板块向东漂移,华南板块略向南漂移,从奥陶纪到志留纪,中国的3个板块整体一起发生了顺时针旋转,3个板块的空间关系由N-S/T格局转变为T-N/S格局,也就是从志留纪以前的华北(简称N)在西、华南(简称S)在东北、塔里木(简称T)在东南的格局(图4c)转变为志留纪以后的塔里木在西、华北在东北、华南在东南的新格局(图6),而且这种新格局一直持续至今.

奥陶纪末—志留纪末中国的3个板块空间格局的大转变与中国的3个板块,尤其塔里木板块周缘的大地构造事件密切相关.

虽然塔里木—华北—华南与冈瓦纳古陆西部的澳大利亚和印度之间存在一个原特提斯洋,但寒武纪—奥陶纪塔里木板块的南缘有中昆仑岛弧开始向塔里木板块靠近,塔里木南缘的库地洋在不断缩小(方爱民等,2010;陈永权等,2015)(图4b,4c);塔里木北缘的南天山洋也在缩小,在奥陶纪末南天山洋由向北的单向俯冲转为双向俯冲,即塔里木北缘由被动陆缘转为主动陆缘(郭瑞清等,2013;高华华等,2016; Han and Zhao, 2018; Yang *et al.*, 2022b)(图4c).奥陶纪末,中昆仑岛弧和阿尔金—祁连岛弧都拼贴到塔里木的南缘,库地洋关闭(方爱民等,2010;张克信等,2015;张建新等,2015;陈永权等,2015),导致塔里木板块快速向北漂移,与南方的冈瓦纳古陆(含澳大利亚)分道扬镳,彻底脱离(图6).塔里木板块在南华纪、震旦纪—中奥陶世都是与冈瓦纳古陆(含澳大利亚)若即若离,处于伸展状态,而从奥陶纪末—志留纪末塔里木板块的南北缘都从被动陆缘状态转为活动陆缘状态,构造性质从伸展转为挤压(Zhang *et al.*, 2009, 2013, 2019;张克信等,2015;李祥权等,2021),塔里木板块从南半球快速向北半球漂移,与冈瓦纳古陆西缘澳大利亚的漂移方向背道而驰.奥陶纪末,中昆仑岛弧和阿尔金—祁连岛弧拼贴到塔里木西南缘和东南缘后,塔里木与甜水海—巴颜喀拉地体和柴达木地块之间为塔里木板块从冈瓦纳古陆脱离出来后新生了南昆仑洋和南阿尔金洋(图6).

秦岭早古生代晚期发育的高压—超高压变质岩石表明华北南缘曾经在440~400 Ma左右与某个板块拼合过,但这个板块不是扬子,因为扬子北缘

没变形变质,据前人对分析,华北南缘在奥陶纪末—志留纪可能与冈瓦纳古陆北缘碰撞拼贴在一起(图6)(Li *et al.*, 2018, 2022).早古生代扬子与华夏已经是一体的华南板块,华南板块东南的华夏经历了早古生代变形变质,且古纬度与澳大利亚相近,地层可对比,因此该时期华南板块很可能与澳大利亚西侧拼合,这一段的原特提斯洋也就闭合了(图6)(Li *et al.*, 2018, 2019, 2022).

3 结论

本文基于经过高置信度遴选的中国3个板块的古地磁数据和全球主要板块的古地磁数据库,利用GPlate软件恢复重建了晚前寒武纪(南华纪末、震旦纪末)至早古生代(寒武纪末、奥陶纪末、志留纪末)的全球板块构造演化格局.基于中国3个板块(华北、华南、塔里木)与世界主要板块的前寒武纪地质的亲缘性对比分析,从大地构造比较学上论证了华北板块从晚前寒武纪处于罗迪尼亚超大陆以东,随着罗迪尼亚超大陆的裂解,华北板块不断地随着劳伦古陆、西伯利亚和波罗的等板块逐渐从超大陆的东侧向东漂移运动至地球的另一侧,并在早古生代华北板块与劳伦古陆、西伯利亚和波罗的等板块一起从地球的另一侧转到超大陆的西侧,使华北板块介于西伯利亚、波罗的与塔里木和华南及澳大利亚之间.

奥陶纪末(440 Ma)是全球板块构造格局,尤其中国3个板块构造格局发生转变的关键时期.在440 Ma之前,塔里木板块与澳大利亚板块的古纬度变迁曲线十分吻合,表明两者处于同一个超大陆内,而440 Ma之后进入志留纪塔里木板块与澳大利亚的古纬度变迁曲线分道扬镳,塔里木板块向北漂移,而澳大利亚板块与冈瓦纳古陆一起向南漂移,这与原特提斯洋(塔里木与澳大利亚之间)的完全打开及其大规模扩张有关.也就是在奥陶纪末—志留纪末,中国3个板块(华北、华南、塔里木)的格局从晚前寒武纪的N-S/T格局(即华北在西、华南在东北、塔里木在东南)转变为T-N/S格局(即塔里木在西、华北在东北、华南在东南),并一直维持至今.这个重大转变与晚前寒武纪罗迪尼亚超大陆的裂解和早古生代末中国3个板块之间的洋陆格局变迁密切相关,与从伸展的大地构造环境向缩短的大地构造环境转变有关,并控制着塔里木板块、华北板块和华南板块上的各类盆地的发育和演化.

致谢:本研究在讨论过程中得到浙江大学陈汉林教授、程晓敢教授、林秀斌教授、中国海洋大学李三忠教授、中国石油大学(北京)漆家福教授、中国科学院地质与地球物理研究所李曰俊教授和西南石油大学邬光辉教授的帮助并提出了宝贵的意见,在此一并感谢.另外感谢北京大学的研究生魏论研和吴尚欣参与了部分图件的清绘工作.

References

- Blakey, R. C., 2008. Gondwana Paleogeography from Assembly to Breakup—A 500 M.y. Odyssey. Special Paper 441: Resolving the Late Paleozoic Ice Age in Time and Space. Geological Society of America, 1–28. [https://doi.org/10.1130/2008.2441\(01\)](https://doi.org/10.1130/2008.2441(01))
- Chen, H. L., Lin, X. B., Cheng, X. G., et al., 2019. The Late Neoproterozoic Sedimentary Sequences in the Yutang Section Southwest Tarim Basin and Their Tectonic Implications and Hydrocarbon Perspective: Insight from Basinology. *Precambrian Research*, 333: 105432. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105432>
- Chen, Y., Xu, B., Zhan, S., et al., 2004. First Mid-Neoproterozoic Paleomagnetic Results from the Tarim Basin (NW China) and Their Geodynamic Implications. *Precambrian Research*, 133(3/4): 271–281. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.05.002>
- Chen, Y.Q., Yan, W., Han, C.W., et al., 2015. Redefinition on Structural Paleogeography and Lithofacies Paleogeography Framework from Cambrian to Early Ordovician in the Tarim Basin: A New Approach Based on Seismic Stratigraphy Evidence. *Natural Gas Geoscience*, 26(10): 1831–1843(in Chinese with English abstract).
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., et al., 1994. Effect of Recent Revisions to the Geomagnetic Reversal Time Scale on Estimates of Current Plate Motions. *Geophysical Research Letters*, 21(20): 2191–2194. <https://doi.org/10.1029/94gl02118>
- Fang, A.M., Li, J.L., Chu, Z.Y., 2010. Sm-Nd Isotopic Ages of Basic Rocks in Kudi Ophiolite of West Kunlun. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 45(1): 113–121(in Chinese with English abstract).
- Gao, H.H., He, D.F., Tong, X.G., et al., 2016. Tectonic-Depositional Environment and Proto-Type Basins during the Depositional Period of Middle Ordovician Yijianfang Formation in Tarim Basin. *Journal of Palaeogeography*, 18(6): 986–1001(in Chinese with English abstract).
- Guo, R.Q., Qin, Q., Muhetaer, Z., et al., 2013. Geological Characteristics and Tectonic Significance of Ordovician Granite Intrusions in the Western Segment of Quruqtagh, Xinjiang. *Earth Science Frontiers*, 20(4): 251–263(in Chinese with English abstract).
- Han, Y. G., Zhao, G. C., 2018. Final Amalgamation of the Tianshan and Junggar Orogenic Collage in the Southwestern Central Asian Orogenic Belt: Constraints on the Closure of the Paleo-Asian Ocean. *Earth-Science Reviews*, 186: 129–152. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2017.09.012>
- Hou, G. T., Santosh, M., Qian, X. L., et al., 2008. Configuration of the Late Paleoproterozoic Supercontinent Columbia: Insights from Radiating Mafic Dyke Swarms. *Gondwana Research*, 14(3): 395–409. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.01.010>
- Huang, B. C., Yan, Y. G., Piper, J. D. A., et al., 2018. 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.earsci-rev.2018.02.004>
- Huang, B.C., Zhou, Y.X., Zhu, R.X., 2008. Discussions on Phanerozoic Evolution and Formation of Continental China, Based on Paleomagnetic Studies. *Earth Science Frontiers*, 15(3): 348–359(in Chinese with English abstract).
- Li, S. Z., Li, X. Y., Wang, G. Z., et al., 2019. Global Meso-Neoproterozoic Plate Reconstruction and Formation Mechanism for Precambrian Basins: Constraints from Three Cratons in China. *Earth-Science Reviews*, 198: 102946. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2019.102946>
- Li, S. Z., Zhao, S. J., Liu, X., et al., 2018. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic Amalgamation of Microcontinental Blocks in East Asia. *Earth-Science Reviews*, 186: 37–75. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2017.01.011>
- Li, S.B., Chen, B.L., Chen, Z.L., et al., 2013. Geochemistry and Tectonic Implications of the Early Paleozoic Felsic to Intermediate Volcanic Rocks from Kaladawan Area, North Altyn. *Geological Review*, 59(3): 423–436 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. Q., Ding, H. K., Peng, P., et al., 2021. Provenance of Silurian Kepingtage Formation in Tazhong Area, Tarim Basin: Evidence from Detrital Zircon U-Pb Geochronology. *Earth Science*, 46(8): 2819–2831 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. L., Xiao, W. J., Zheng, J. P., et al., 2022. Northward Subduction of the South Qilian Ocean: Insights from Early Paleozoic Magmatism in the South-Central Qilian Belts. *Geosystems and Geoenvironment*, 1(1): 100013. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2021.100013>

- Li, Z. X., Bogdanova, S. V., Collins, A. S., et al., 2008. Assembly, Configuration, and Break-up History of Rodinia: A Synthesis. *Precambrian Research*, 160(1/2): 179–210. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.021>
- Scotese, C. R., 1997. Paleogeographic Atlas. PALEOMAP Progress Report 90-0497, Department of Geology, University of Texas at Arlington, Texas, P45.
- Wang, H.H., Li, J.H., Yang, J.Y., et al., 2013. Paleo-Plate Reconstruction and Drift Path of Tarim Block from Neoproterozoic to Early Palaeozoic. *Advances in Earth Science*, 28(6): 637–647(in Chinese with English abstract).
- Wen, B., Evans, D. A. D., Li, Y. X., 2017. Neoproterozoic Paleogeography of the Tarim Block: An Extended or Alternative “Missing-Link” Model for Rodinia? *Earth and Planetary Science Letters*, 458: 92–106. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.10.030>
- Yang, F. L., Zhou, X. F., Hu, Y. Y., et al., 2022a. Neoproterozoic Extensional Basins and Its Control on the Distribution of Hydrocarbon Source Rocks in the Yangtze Craton, South China. *Geosystems and Geoenvironment*, 1(1): 100015. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2021.100015>
- Yang, G. X., Li, Y. J., Tong, L. L., et al., 2022b. Natural Observations of Subduction Initiation: Implications for the Geodynamic Evolution of the Paleo-Asian Ocean. *Geosystems and Geoenvironment*, 1(1): 100009. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2021.10.004>
- Young, A., Flament, N., Maloney, K., et al., 2019. Global Kinematics of Tectonic Plates and Subduction Zones since the Late Paleozoic Era. *Geoscience Frontiers*, 10(3): 989–1013. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.05.011>
- Zhan, S., Chen, Y., Xu, B., et al., 2007. Late Neoproterozoic Paleomagnetic Results from the Sugetbrak Formation of the Aksu Area, Tarim Basin (NW China) and Their Implications to Paleogeographic Reconstructions and the Snowball Earth Hypothesis. *Precambrian Research*, 154(3/4): 143–158. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.01.001>
- Zhang, C. L., Li, Z. X., Li, X. H., et al., 2009. Neoproterozoic Mafic Dyke Swarms at the Northern Margin of the Tarim Block, NW China: Age, Geochemistry, Petrogenesis and Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(2): 167–179. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2009.02.003>
- Zhang, C. L., Ye, X. T., Ernst, R. E., et al., 2019. Revisiting the Precambrian Evolution of the Southwestern Tarim Terrane: Implications for Its Role in Precambrian Supercontinents. *Precambrian Research*, 324: 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.01.018>
- Zhang, C. L., Zou, H. B., Li, H. K., et al., 2013. Tectonic Framework and Evolution of the Tarim Block in NW China. *Gondwana Research*, 23(4): 1306–1315. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.05.009>
- Zhang, J.X., Yu, S.Y., Li, Y.S., et al., 2015. Subduction, Accretion and Closure of Proto-Tethyan Ocean: Early Paleozoic Accretion/Collision Orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam Orogenic System. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12): 3531–3554(in Chinese with English abstract).
- Zhang, K.X., Pan, G.T., He, W.H., et al., 2015. New Division of Tectonic-Strata Superregion in China. *Earth Science*, 40(2): 206–233(in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. C., Wang, Y. J., Huang, B. C., et al., 2018. Geological Reconstructions of the East Asian Blocks: From the Breakup of Rodinia to the Assembly of Pangea. *Earth-Science Reviews*, 186: 262–286. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.10.003>

附中文参考文献

- 陈永权, 严威, 韩长伟, 等, 2015. 塔里木盆地寒武纪—早奥陶世构造古地理与岩相古地理格局再厘定: 基于地震证据的新认识. *天然气地球科学*, 26(10): 1831–1843.
- 方爱民, 李继亮, 储著银, 2010. 西昆仑库地蛇绿岩中基性火山岩的 Sm-Nd 等时线年龄. *地质科学*, 45(1): 113–121.
- 高华华, 何登发, 童晓光, 等, 2016. 塔里木盆地中奥陶世—一间房组沉积时期构造—沉积环境与原型盆地特征. *古地质量报*, 18(6): 986–1001.
- 郭瑞清, 秦切, 木合塔尔·扎日, 等, 2013. 新疆库鲁克塔格西段奥陶纪花岗岩体地质特征及构造意义. *地学前缘*, 20(4): 251–263.
- 黄宝春, 周桃秀, 朱日祥, 2008. 从古地磁研究看中国大陆形成与演化过程. *地学前缘*, 15(3): 348–359.
- 李松彬, 陈柏林, 陈正乐, 等, 2013. 阿尔金北缘喀腊大湾地区早古生代中酸性火山熔岩岩石地球化学特征及其构造环境. *地质论评*, 59(3): 423–436.
- 李祥权, 丁洪坤, 彭鹏, 等, 2021. 塔里木盆地塔中志留系柯坪塔格组物源示踪: 碎屑锆石 U-Pb 年代学证据. *地球科学*, 46(8): 2819–2831.
- 王洪浩, 李江海, 杨静懿, 等, 2013. 塔里木陆块新元古代—早古生代古板块再造及漂移轨迹. *地球科学进展*, 28(6): 637–647.
- 张建新, 于胜尧, 李云帅, 等, 2015. 原特提斯洋的俯冲、增生及闭合: 阿尔金—祁连—柴北缘造山系早古生代增生/碰撞造山作用. *岩石学报*, 31(12): 3531–3554.
- 张克信, 潘桂棠, 何卫红, 等, 2015. 中国构造—地层大区划分新方案. *地球科学*, 40(2): 206–233.