

李维波, 李江海, 王洪浩, 等. 二叠纪古板块再造与岩相古地理特征分析[J]. 中国地质, 2015, 42(2): 685–694.

Li Weibo, Li Jianghai, Wang Honghao, et al. Characteristics of the reconstruction of Permian paleoplate and lithofacies paleogeography[J]. Geology in China, 2015, 42(2): 685–694(in Chinese with English abstract).

## 二叠纪古板块再造与岩相古地理特征分析

李维波<sup>1,2</sup> 李江海<sup>1,2</sup> 王洪浩<sup>1,2</sup> 塔斯肯<sup>1,2</sup>

(1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;  
2. 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871)

**摘要:**依据古地磁方法,对二叠纪全球古板块进行再造,并在此基础上,结合区域地质资料,编制了二叠系全球古板块再造图、全球岩相及烃源岩分布图和全球古地理图。二叠纪板块格局以泛大陆和泛大洋为主,大陆内部裂谷系(如劳亚板块内部北海—北大西洋裂谷系和非洲大陆内部裂谷系)持续发育,最终导致了泛大陆的裂解。二叠纪冰期持续发育,又由于干旱带广泛发育的古气候条件,造成全球海平面在晚二叠世达到整个显生宙的最低值。浅海广泛发育的古地理环境造成古、新特提斯洋周缘和劳亚大陆整体以浅海碳酸盐岩和海相碎屑岩沉积为主。冈瓦纳大陆内部以河湖相碎屑岩沉积为主。二叠系烃源岩不发育,主要层系是下二叠统泥页岩,分布集中在劳亚大陆北缘、特提斯洋周缘以及冈瓦纳大陆内部和澳大利亚东部,以海陆过渡相沉积环境为主。泛大陆形成过程中,洋壳消减与不同陆块之间的拼合,最终造成了二叠纪末气候的剧变,形成了晚古生代末超大规模的冰期。板块运动所产生的壳幔物质循环造成二叠纪全球二氧化碳含量剧烈升高,最终导致了二叠纪生物灭绝程度最大。

**关键词:**二叠纪;古板块再造;岩相古地理;烃源岩分布

中图分类号:P534.46;P531

文献标志码:A

文章编号:1000-3657(2015)02-0685-10

## Characteristics of the reconstruction of Permian paleoplate and lithofacies paleogeography

LI Wei-bo<sup>1,2</sup>, LI Jiang-hai<sup>1,2</sup>, WANG Hong-hao<sup>1,2</sup>, A. Taskyn<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Institute of Oil and Gas, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Basing on paleomagnetic methods, the authors reconstructed the location of Permian paleoplate, And combination with regional geological information, compiled the Permian global paleoplate map, global lithofacies paleogeography map and distribution map of hydrocarbon source rocks in Permian. Pangea and Panthalassa around were the main continental pattern. Rift systems were well developed, such as the North Sea–North Atlantic rift system in Laurasia and the rift system in African. The continuous development of the rift systems eventually led to the breakup of Pangea. Meanwhile, Due to the continuous development of glaciation in Permian and the widespread drought environment, global sea levels in the late Permian reached the

收稿日期:2014-02-27;改回日期:2014-06-12

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”项目(2009CB219302)资助。

作者简介:李维波,男,1989年生,博士生,主要从事构造地质学和石油地质学研究;E-mail:liweibo21074@163.com。

lowest in Phanerozoic. Shallow seas were widely spread around Neo-Tethys and Paleo-Tethys. These paleogeographic environments caused the deposition of shallow marine carbonate and clastic sediments in the whole Neo-Tethys periphery and Laurasia. Lacustrine clastic sediments were deposited internally in Gondwana. Source rocks in Permian were not widely developed, the main layer system was Lower Permian shale, which was mainly concentrated in the northern margin of Laurasia, Tethys periphery and interior of Gondwana as well as eastern margin of Australia, dominated by transitional facies depositional environment.

**Key words:** Permian; paleoplate reconstruction; lithofacies paleogeography; hydrocarbon source rock distribution

**About the first author:** LI Wei-bo, male, born in 1989, doctor candidate, engages in the study of structural geology and petroleum geology; E-mail: liweibo21074@163.com.

二叠纪是地质演化历史的重要时期,全球板块在晚古生代持续汇聚,最终在二叠纪拼合形成泛大陆。此时,全球板块格局相对简单,以泛大陆和环绕其的泛大洋为主。冰期在二叠纪持续发育,同时古气候变得干燥,造成全球海平面在整个晚古生代一直下降,在晚二叠世达到整个显生宙的最低值。二叠纪发生地球演化历史过程最大规模的生物灭绝事件,造成将近90%海洋生物和70%的陆地生物灭绝。前人对二叠纪全球古板块再造和岩相古地理开展了大量研究<sup>[1-7]</sup>,并且形成了不同系列的全球古板块再造、全球古气候、岩相古地理等图件,但这些图件的精度相对较低或者只是单一地去探讨关于古板块、古生物分布、岩相古地理等问题,并未普遍对不同圈层不同事件综合考虑,缺乏对二叠纪地质事件及构造背景、古环境等之间的相互讨论。

本文在板块构造、地幔柱、盆地分析等理论的指导下,依据最新的全球古地磁数据和区域地质资料等,恢复了二叠纪全球板块古位置,并结合前人资料,完成二叠纪(260Ma)全球古板块再造。以板块构造格为基础,通过对全球二叠系沉积盆地地层进行分析,并辅以油气地质数据库和资料,恢复二叠纪全球岩相古地理,分析二叠纪古板块再造与岩相古地理特征,探讨二叠纪泛大陆的形成对地球各圈层的影响。

## 1 二叠纪古板块构造格局

泛大陆志留纪开始逐渐聚合,形成于劳伦大陆、波罗的、西伯利亚、冈瓦纳等大陆持续向北纬地区运动过程(图1,图2)。其中,西伯利亚在晚古生代还持续地发生顺时针转动<sup>[8]</sup>。晚二叠世(约250Ma)泛大陆规模达到最大,东缘出现新的洋壳<sup>[9-11]</sup>。泛大陆形成过程中,形成中亚造山带<sup>[12-13]</sup>、乌拉尔造

山带<sup>[14]</sup>、华力西—阿巴拉契亚造山带<sup>[15]</sup>、秦岭—大别造山带<sup>[16, 17]</sup>、天山—突厥造山带<sup>[18, 19]</sup>、索伦山造山带<sup>[20, 21]</sup>、泰梅尔造山带<sup>[10]</sup>(图2)。它们主要出现于劳亚大陆及其周围,造成泛大陆的最终拼合。泛大陆聚合过程中,全球所有板块并未同时聚合,柴达木地体、昆仑地体、华北陆块等分布在泛大陆的边缘。

420~260 Ma期间,非洲板块中心位置由南纬50°左右向北移动到南纬10°左右;北美板块中心位置,由南纬20°左右向北移动到北纬10°左右。西伯利亚板块中心在早志留世(440 Ma)在北纬10°左右位置,之后一直向北移动,晚石炭世到早二叠世(300 Ma)移动到北纬75°,之后向南移动,250 Ma左右的时候移动到北纬60°左右位置。在440~250 Ma期间,波罗地板块中心位置由南纬50°左右向北运动到南纬10°左右;在380~260 Ma期间,澳大利亚板块中心位置由南纬5°左右向南运动到南极附近。440~250 Ma期间,扬子陆块一直在赤道附近移动,纬度变化较小。在380~340 Ma期间,华北陆块则现为由北纬15°左右向赤道移动,到340~260 Ma期间,又由赤道向北移动。综上所述,在泛大陆聚合过程中,南美板块、西伯利亚板块、波罗的板块、澳大利亚板块、塔里木陆块、华北陆块等在古生代的运动轨迹总体上具有顺时针旋转的趋势,多个板块呈顺时针的漩涡式运动聚合。在上述聚合过程中,板块的汇聚中心在现在的中亚地区(图1)。

二叠纪,古亚洲洋盆(蒙古—鄂霍茨克洋)持续收缩,古特提斯洋向北俯冲,基默里陆块群开始从冈瓦纳大陆裂解,向北运动,其南侧的新特提斯洋开始扩张。塔里木、华北、扬子、阿穆尔等陆块群处于古亚洲洋和古特提斯洋之间。华北和阿穆尔陆块间发育有双向俯冲的索伦洋。华北和扬子陆块间发育秦岭洋。西伯利亚板块持续的向南运动,板

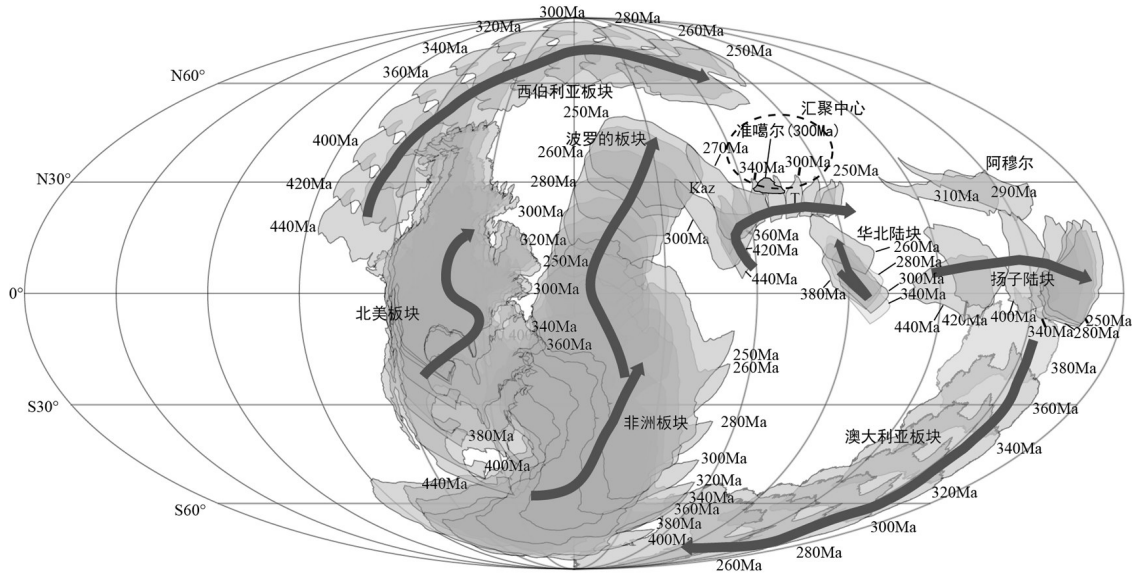


图1 泛大陆晚古生代聚合过程中不同板块和陆块运动轨迹示意图<sup>[15, 22-28]</sup>

(摩尔维特式投影; Kaz代表哈萨克斯坦板块, T代表塔里木陆块; 图中箭头指示板块运动趋势, 标有不同数值的板块形态指示其当时的位置, 虚线圆圈指示板块汇聚中心)

Fig.1 Drift paths of different plates and blocks during the process of assembly of Pangea in Late Paleozoic<sup>[15, 22-28]</sup>

(Mollweide projection, Kaz represents Kazakhstan Plate, T represents Tarim Block; The arrows indicate the movement trend of plates and blocks, the plate morphology with different values indicates paleolocation and time; Dashed circle indicates the convergence center of plates)

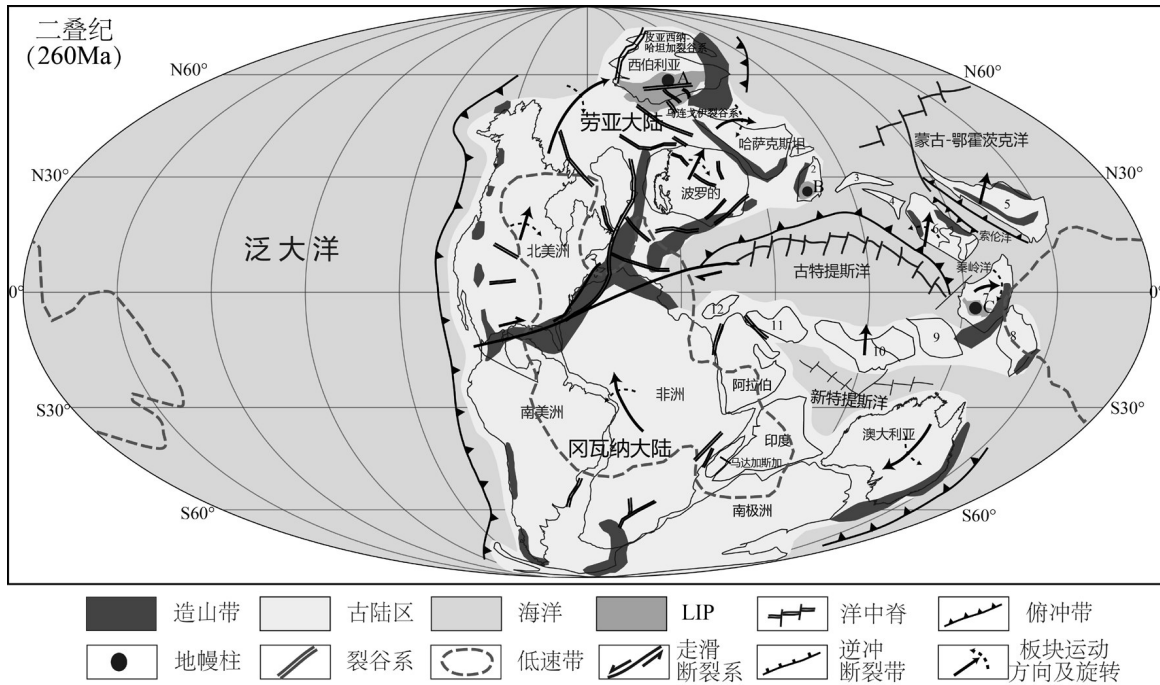


图2 泛大陆(约260 Ma)板块再造图<sup>[2, 4, 6, 22, 27, 29-31]</sup>

1—准噶尔; 2—塔里木陆块; 3—柴达木地体; 4—昆仑地体; 5—阿穆尔陆块; 6—华北陆块; 7—扬子陆块; 8—加里曼丹板块; 9—印支板块; 10—马来西亚陆块; 11—伊朗板块; 12—土耳其板块; A—西伯利亚地幔柱((250±1) Ma); B—塔里木地幔柱((280±10) Ma); C—峨眉山地幔柱((259±3) Ma)

Fig. 2 Tectonic framework of Pangea at 260 Ma<sup>[2, 4, 6, 22, 27, 29-31]</sup>

1—Junggar; 2—Tarim block; 3—Qaidam terrane; 4—Kunlun terrane; 5—Amuria block; 6—North China block; 7—Yangtze Block; 8—Kalimantan plate; 9—Indo-plate; 10—Malaysia block; 11—Iranian plate; 12—Turkey plates; A—Siberian mantle plume ((250 ± 1) Ma); B—Tarim mantle plume ((280 ± 10) Ma); C—Emeishan mantle plume ((259 ± 3) Ma)

块自身同时顺时针旋转,造成蒙古—鄂霍茨克洋向北的俯冲。泛大陆外围被泛大洋环绕,两者之间出现巨大规模的俯冲带<sup>[2]</sup>。泛大陆聚合后,板块之间的位置通过走滑断裂进行调整,如劳亚大陆与冈瓦纳大陆间,发育规模巨大的左旋走滑断裂系;西伯利亚板块、波罗的板块、哈萨克斯坦板块、准噶尔地体和塔里木陆块等中亚地区,也通过大型右旋走滑断裂调整。

泛大陆聚合过程中,大陆内部发育多个地幔柱和裂谷系<sup>[30]</sup>(图2)。西伯利亚板块上发育有251 Ma的地幔柱,地幔柱的发育形成了西伯利亚裂谷系。塔里木陆块发育有251~272 Ma的地幔柱和火山岩省。扬子陆块上发育约259 Ma峨眉山地幔柱,形成了峨眉山玄武岩省。劳伦和冈瓦纳大陆下面发育上地幔柱低速带<sup>[4]</sup>。

劳亚大陆和冈瓦纳大陆内部均发育有三叉裂谷(图2)。北美和波罗的和非洲大陆间发育有北海—北大西洋裂谷系,并逐渐演化成洋壳,最终造成大陆间的裂解。南美和非洲大陆间发育南大西洋裂谷系,造成两板块在侏罗纪的最终分离。非洲大陆内部,阿拉伯板块与非洲大陆东缘发育红海裂谷系;马达加斯加板块与非洲大陆东缘发育索马里裂谷系,后来都演化成洋盆,造成冈瓦纳大陆的裂解。

## 2 二叠纪岩性柱状图对比

本文总结筛选了二叠纪部分盆地的地层柱状

图(图3~5)。其中,图3为劳亚北缘柱状对比图,上部地层柱状图从左往右分别为波罗的板块内巴伦支海盆地和巴伦支地台盆地,地层表现为海相碳酸盐岩相。劳亚大陆内部乌拉尔山前为河湖相和蒸发岩台地相地层。由北到南整体表现为开阔海—局限海湾环境。

特提斯周缘的陆块均上沉积浅海碎屑岩到碳酸盐相地层。劳亚大陆南缘塔里木盆地为河湖相,华北陆块上的鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地地区均为海相的碎屑岩沉积,扬子陆块上的四川盆地和南黄海盆地均为海相碎屑岩到碳酸盐岩沉积(图4)。古、新特提斯洋周缘陆块上均沉积浅海碳酸盐台地相地层。

冈瓦纳大陆内部的亚马逊、查科—巴拉纳盆地、Majunga盆地均为陆相砂泥岩(图5)。澳大利亚板块内部的波拿巴和东澳大利亚盆地也以河湖相地层为主。其中,亚马逊盆地东缘、查科—巴拉纳盆地内部发育下二叠统冰碛岩;澳大利亚板块边缘的巴拿巴盆地和东澳大利亚盆地发育有多套冰碛岩夹层,代表该区域长时期的冰盖。非洲大陆北缘非洲北部二叠系地层缺失,区域整体遭受剥蚀抬升。

整体可以看出,古、新特提斯洋周缘和劳亚大陆整体以海相碳酸盐岩沉积为主,冈瓦纳大陆内部以河湖相碎屑岩沉积为主。

## 3 二叠纪岩相特征

古地理和古气候带决定了岩相带的分布(图

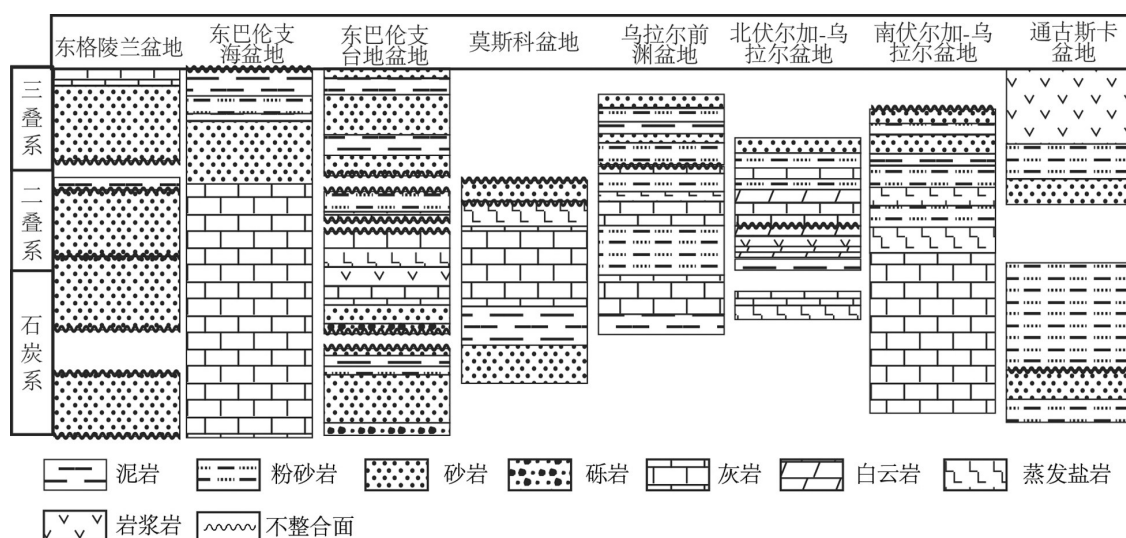


图3 劳亚北缘柱状对比图<sup>[32]</sup>

Fig.3 Columnar correlation of basins on the northern margin of Laurasia<sup>[32]</sup>

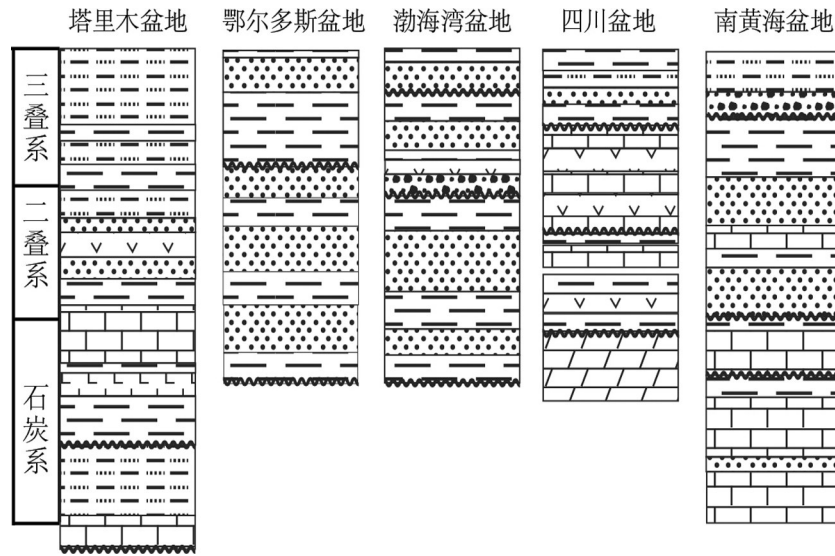


图4 古特提斯洋北缘柱状对比图<sup>[32]</sup>(图例参照图3)

Fig.4 Columnar correlation of basins on the northern margin of Paleo-Tethys<sup>[32]</sup>(legends as for Fig. 3)

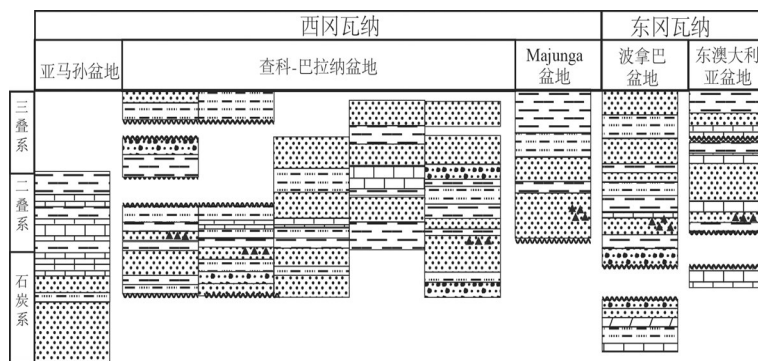


图5 冈瓦纳大陆中部东西向盆地柱状对比图<sup>[32]</sup>(图例参照图3,其中三角形代表冰碛岩)

Fig.5 Columnar correlation of basins in Gonwana<sup>[32]</sup>(legends as for Fig. 3, triangles represent tillite)

6)。二叠纪(250~270 Ma),陆表海环境岩相整体以碳酸岩台地相为主,范围包括泛大陆北缘、东缘以及东冈瓦纳大陆北缘以及古、新特提斯洋周缘<sup>[1, 33]</sup>。其中,位于热带区域的基默里陆块群、扬子、华北等陆块,以白云岩相为主,泛大陆北缘、东缘以灰岩相为主。波罗的地台和印度板块西北缘发育局限的海湾,且均位于干旱带,发育蒸发岩相。从陆表海往深海方向,沉积深海泥页岩相。非洲大陆内部,以河湖相碎屑岩岩相沉积为主。

二叠纪末,生物大灭绝事件提供了丰富的有机质来源,但海平面在晚古生代一直处于下降状态,并在晚二叠世达到整个显生宙的最低值<sup>[1]</sup>。二叠纪,有机质来源丰富,烃源岩的发育主要受有机质保存条件的

限制。二叠纪,烃源岩主要形成在板块边缘的浅海-半深海环境和板块内部的半深湖-深湖环境。

烃源岩分布具有以下规律:(1)新特提斯洋南缘的被动陆缘盆地中,如阿拉伯盆地、澳洲西北缘的盆地。烃源岩形成在浅海碳酸盐岩台地相中。其中,阿拉伯盆地的烃源岩中,干酪根类型以“II”型为主,发育少量的“I”型干酪根,有机质多来源于海相浮游生物,有机质丰度较高,烃源岩品质较好;澳大利亚西北缘的被动陆缘盆地烃源岩,干酪根类型以“II”型为主,发育少量“III”型干酪根。(2)泛大陆中部裂谷盆地,如西西伯利亚盆地、冈瓦纳内部的查科-巴拉纳盆地等。西西伯利亚盆地烃源岩沉积在浅海-半深海环境,干酪根类型以“II”

表1 二叠纪全球重要烃源岩分布<sup>[21]</sup>

Table 1 Distribution list of the major hydrocarbon source rocks in Permian

编号	盆地/油气区	构造属性	沉积环境	干酪根类型	烃源岩(主要)
1	巴伦支海盆地	克拉通	浅海相	II、III	上二叠统泥页岩
2	波罗的东南部 (莫斯科盆地、第聂伯河顿涅茨盆地、波罗的拗陷)	克拉通	河湖相—浅海相	II、III	上二叠统泥页岩
3	中亚 (准噶尔盆地、锡尔河盆地)	前渊	河湖相	II、III	下二叠统泥页岩
4	四川盆地	克拉通	浅海-深海相	II、I	上二叠统页岩
5	渤海湾盆地	裂谷	海相	II	石河子组泥页岩
6	二叠盆地	克拉通	海陆过渡相	II、III	下二叠统页岩
7	阿拉伯油气区 (中阿拉伯、鲁卜哈利、扎格罗斯盆地)	台地—被动陆缘	浅海—深海相	II、I—II	Khuff、Faraghan FM 泥页岩
8	Majunga 盆地	裂谷	河湖相	III、II	上二叠统泥页岩
9	东冈瓦纳西北部 (波拿巴特盆地、东澳大利亚盆地)	被动陆缘—台地	河流、三角洲相	II、III	下二叠统页岩、泥岩
10	西冈瓦纳中部 (亚马逊、查科巴拉纳、帕内盆地)	克拉通	河湖相	II—III、II	下二叠统泥页岩

型为主。冈瓦纳内部的烃源岩多沉积在河湖相环境中,干酪根类型偏“III”型。(3)稳定板块上克拉通盆地,如华北陆块上的鄂尔多斯和渤海湾盆地、扬子陆块上的四川盆地、波罗的板块上的巴伦支海盆地、莫斯科盆地、第聂伯河顿涅茨盆地等。其中,扬子和华北陆块上的烃源岩,沉积在海相碳酸盐岩中,干酪根类型以“II”型为主。波罗的北缘的烃源岩沉积在碳酸盐岩台地相中,干酪根类型以“II”型为主。波罗的内部的烃源岩沉积在半深湖—深湖环境,干酪根类型为“II—III”型。

烃源岩层系主要是下二叠统,分布在劳亚大陆北缘、特提斯洋周缘以及冈瓦纳大陆内部和澳大利亚东部(图7),烃源岩以海相沉积环境为主。

#### 4 二叠纪古地理恢复

二叠纪(约260 Ma)的古地理恢复表明(图7),不同板块间造山带表现为陆表山脉的特征。泛大陆北缘和东缘以及东冈瓦纳大陆的北缘处于浅海—深海环境<sup>[2,6]</sup>。其中,波罗的与北美板块和哈萨克斯坦板块间,表现为局限海湾。海平面在晚古生代一直处于下降状态,并在二叠纪末达到整个显生宙的最低值<sup>[1]</sup>,泛大陆周缘的柴达木地体、昆仑地体、华北陆块、阿穆尔陆块、扬子陆块等在晚二叠(约270 Ma)均为陆表海环境<sup>[2,6]</sup>。基默里陆块群整体也处于陆表海环境。

冈瓦纳大陆在二叠纪发生大规模冰期。到晚二叠世,冰川范围逐渐缩小。270 Ma时,冰盖主要

分布在东冈瓦纳南缘,包括澳大利亚板块南缘和整个南极大陆。晚二叠世,冰碛岩分布在澳大利亚板块的东南缘<sup>[5]</sup>,北半球劳亚大陆至今未发现石炭纪—二叠纪的冰川遗迹。

晚二叠世,西伯利亚板块北缘、南极板块和澳大利亚板块南缘较小区域位于寒带(图7)。劳亚大陆北部(N40°~N75°)和冈瓦纳大陆南部(S50°~S75°)位于温带。这一时期热带气候,仅在古特提斯洋北缘和新特提斯洋南缘之间发育,西边以华力西—阿巴拉契亚造山带和非洲北缘的造山带为界,主要包括基默里陆块群,扬子陆块和华北陆块等,泛大陆其余区域均为干旱带环境<sup>[5]</sup>。

#### 5 二叠纪泛大陆形成对全球各圈层的影响

全球层圈变化曲线表利用曲线简要说明了岩石圈、水圈、大气圈以及生物圈之间,自寒武纪以来的耦合关系(表2)。地质历史中,超大陆旋回对全球海平面和气候的变化具有重要影响<sup>[35]</sup>。全球海平面的变化与地球表层大洋和大陆的分布有着密切关系,大洋和大陆相对面积的变化会使海平面上升或下降;另一方面,大陆岩石圈板块的聚合和分离也会造成海平面的变化。

显生宙期间,全球海平面经历了持续的变动,其变化呈明显的波动形式,并且在不同地质时代变化速率不同(表2)。具体而言,海平面在地质时代中的每一个纪都至少出现一次波峰波谷,尤其是在

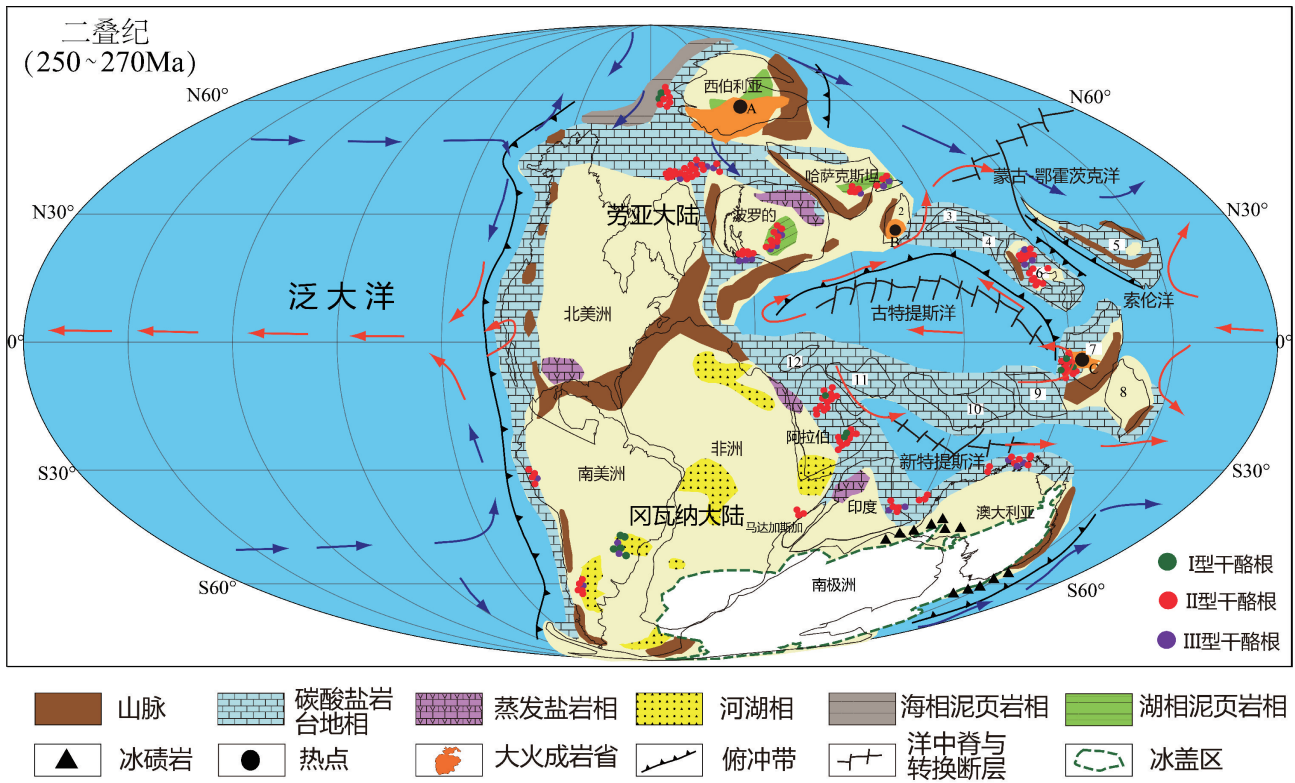


图6 二叠纪(250~270 Ma)岩相恢复图<sup>[1, 32, 33]</sup>

Fig.6 Reconstruction of the lithofacies in Permian(250~270 Ma)<sup>[1, 32, 33]</sup>

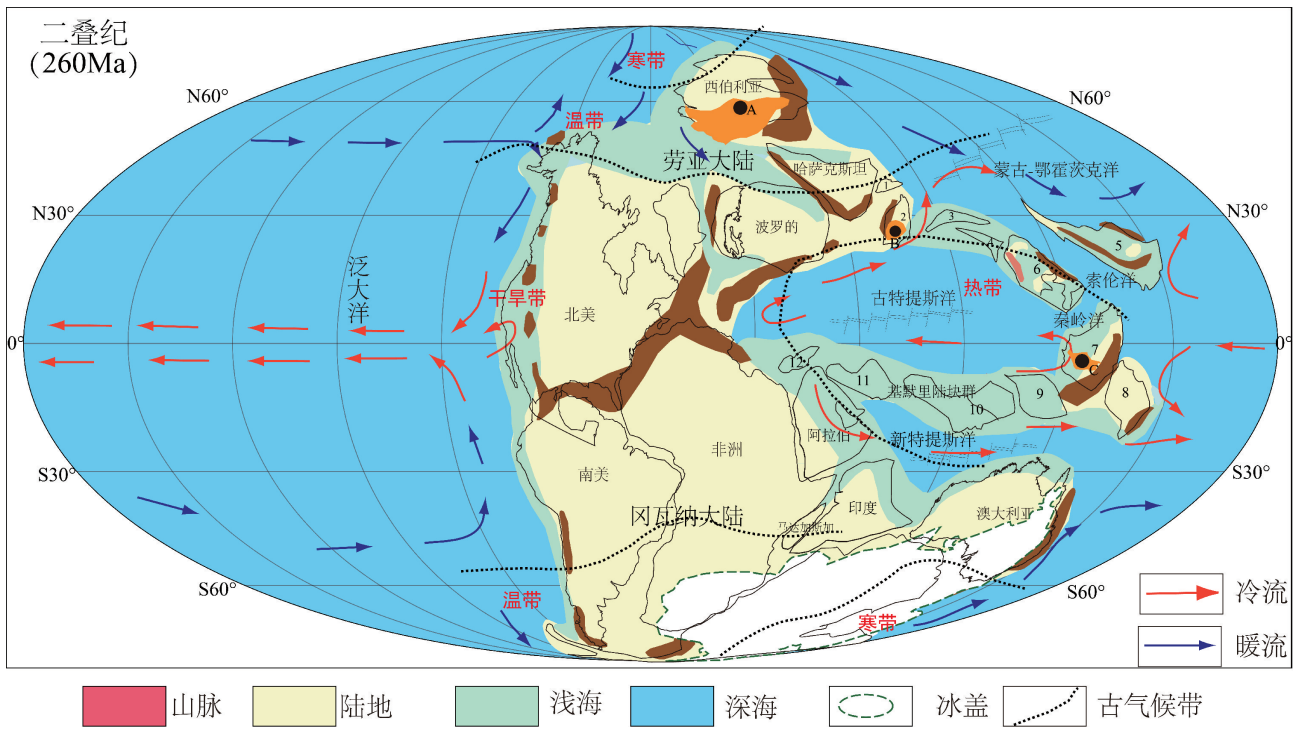


图7 二叠纪(约260Ma)古地理和古气候带恢复图<sup>[2, 5, 6, 34]</sup>

Fig.7 Reconstruction of the paleogeography and climate in Permian<sup>[2, 5, 6, 34]</sup>

近五千万年来的古近—新近纪以来,海平面出现的波峰波谷次数最多,而在较早的寒武纪,变化则相对较缓。在气候方面,寒武纪以来,伴随着罗迪尼亚超大陆和泛大陆的形成与裂解,全球大致出现了3次冰期<sup>[36]</sup>:第一次是在晚奥陶世—志留纪冰期(460~420 Ma);第二次是在石炭纪—早二叠世冰期(360~260 Ma);第三次是上新世—第四纪冰期(2.58 Ma至今)<sup>[37]</sup>。古生代末全球冰期与泛大陆聚合有着密切联系,洋壳消减与不同陆块之间的拼合最终造成了二叠纪末气候的剧变。

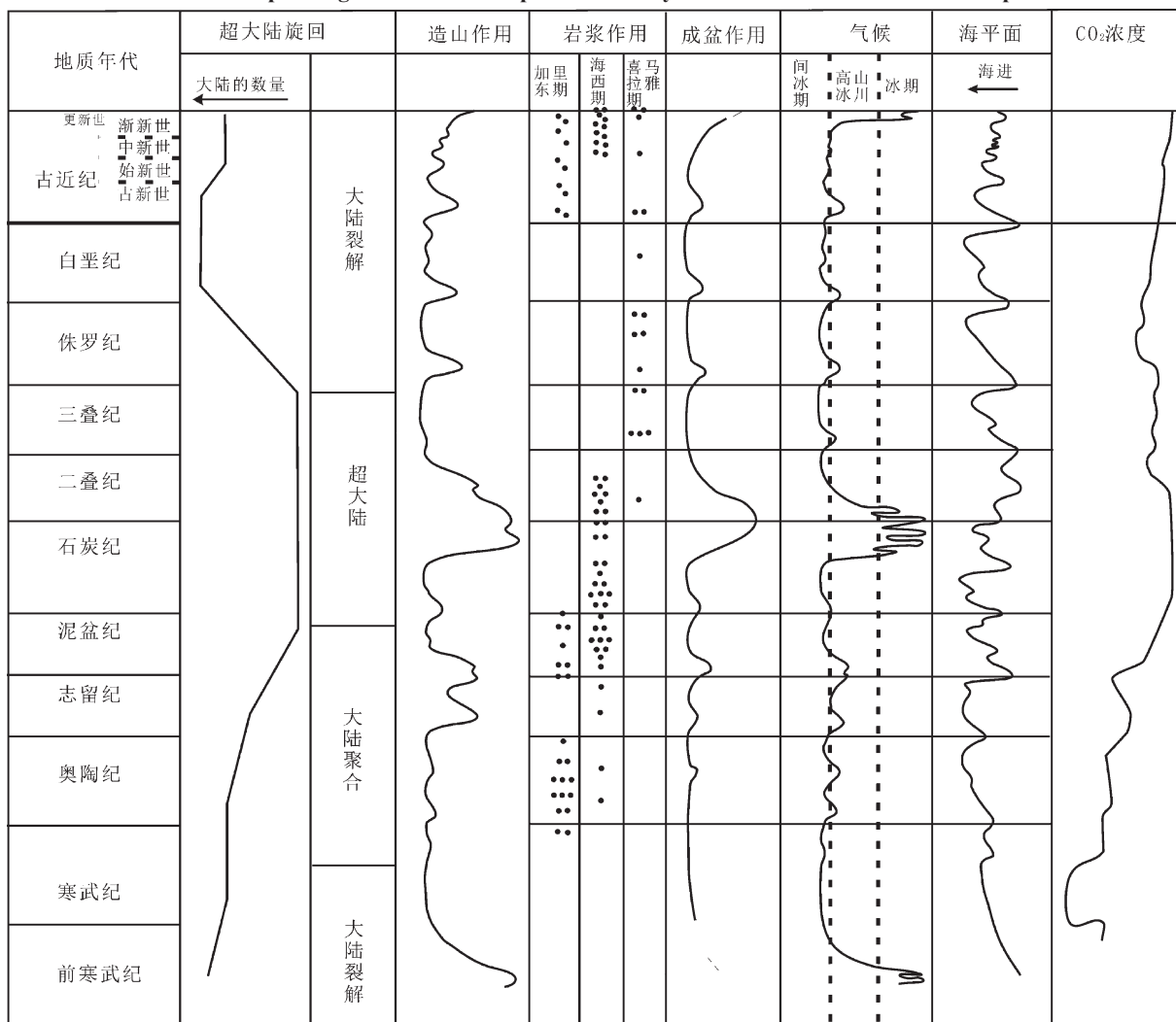
在超大陆旋回的过程中,岩石圈板块会经历扩张、俯冲等重要地质过程,这期间壳幔相互作用非常强烈。大洋扩张阶段,下部的地幔物质上涌。大

洋岩石圈俯冲消减时,又会把大量碳酸盐岩沉积送回地幔。因此,板块构造运动是全球碳循环最为重要的源动力,这与地表和浅海大量分布的碳酸盐岩密切相关。

古生代以来,全球二氧化碳含量整体呈下降趋势,大致呈U字形。U字形的低谷就是泛大陆(包括冈瓦纳)超大陆发生聚合的晚古生代。超大陆聚合过程中,会有大量的碳酸盐沉积随大洋岩石圈俯冲而一同进入地幔,从而导致全球二氧化碳含量的显著降低。而在随后泛大陆的解体过程中,二氧化碳含量则有所回升,这得益于超大陆裂解过程中,软流圈地幔上涌所带动的碳循环<sup>[38]</sup>。地球板块运动所产生的壳幔物质循环是造成全球二氧化碳含量

表2 全球层圈变化曲线与超大陆旋回对应关系<sup>[39]</sup>

Table 2 Corresponding table between supercontinent cycle and variation curve of earth sphere<sup>[39]</sup>





变化的主要原因。

## 6 结 论

(1)晚古生代期间巨型板块(劳伦板块、非洲板块、南美板块、西伯利亚板块)显示稳定而且规律的运动特点,持续向北半球中亚地区汇聚,并具有顺时针转动趋势,在二叠纪最终拼合形成泛大陆。泛大陆内部发育多个裂谷系,持续演化造成后期洋盆的张开和泛大陆的裂解。中国陆块群和基默里陆块群分布在泛大陆周缘。

(2)冰期和干旱带广泛发育的古气候环境,造成全球海平面在整个晚古生代一直下降,在晚二叠世达到整个显生宙的最低值。古、新特提斯洋周缘和劳亚大陆整体以海相碳酸盐岩沉积为主,冈瓦纳大陆内部以河湖相碎屑岩沉积为主。

(3)二叠纪烃源岩层系主要是下二叠统,分布在劳亚大陆北缘、特提斯洋周缘以及冈瓦纳大陆内部和澳大利亚东部,以海相沉积环境为主。

(4)泛大陆形成过程中,洋壳消减与不同陆块之间的拼合最终造成了二叠纪末气候的剧变,形成了晚古生代末超大规模的冰期。板块运动所产生的壳幔物质循环造成全球二氧化碳在二叠纪含量剧烈升高。

### 参考文献(References):

[1] Golonka J, Ford D. Pangean (Late Carboniferous–Middle Jurassic) palaeoenvironment and lithofacies[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 161: 1–34.

[2] Scotese C R. 2002. Paleomap website: <http://www.scotese.com>, [chris@scotese.com](mailto:chris@scotese.com).

[3] Mullins G L, Servais T. The diversity of the Carboniferous phytoplankton [J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2008, 149: 29–49.

[4] Torsvik T H, Steinberger B, Cocks L B M, et al. Longitude: Linking Earth's ancient surface to its deep interior [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 276: 273–282.

[5] Tabor N J, Poulsen C J. Palaeoclimate across the Late Pennsylvanian–Early Permian tropical palaeolatitudes: A review of climate indicators, their distribution, and relation to palaeophysiological climate factors[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 268: 293–310.

[6] Golonka J. Chapter 6 Phanerozoic palaeoenvironment and palaeolithofacies maps of the Arctic region[C]//Spencer A M, Embry A, Gautier D L A, et al. *Arctic Petroleum Geology*, London:

Geological Society of London, 2011, 35: 79–129.

[7] Kravchinsky V A. Paleozoic large igneous provinces of Northern Eurasia: Correlation with mass extinction events[J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 86: 31–36.

[8] Smethurst M A, Khramov A N, Torsvik T H. The Neoproterozoic and Palaeozoic palaeomagnetic data for the Siberian Platform: From Rodinia to Pangea[J]. *Earth–Science Reviews*, 1998, 43:1–24.

[9] Scotese C R. Continental Drift Flip Book 79p PALEOMAP Project (7th edition)[M]. Department of Geology, University of Texas at Arlington, Rotterdam, 1997.

[10] Torsvik T H, Carlos D, Mosar J, et al. Global reconstructions and North Atlantic palaeogeography 440 Ma to Recent[C]//Eide E. *BATLAS–Mid Norway Plate Reconstruction Atlas with Global and North Atlantic Perspectives*. 2002:18–39.

[11] 王鸿祯, 何国琦, 张世红. 中国与蒙古之地质[J]. *地质前缘*, 2006, 13(6): 1–13.

Wang Hongzhen, He Guoqi, Zhang Shihong. The geology of China and Mongolia[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13 (6):1–13 (in Chinese with English abstract).

[12] Abrajvitch A V, Vander Voo R, Bazhenov M L, et al. Paleomagnetism of the mid– Devonian Kurgasholok Formation, Southern Kazakhstan: constraints on the Devonian paleogeography and oroclinal bending of the Kazakhstan volcanic arc[J]. *Tectonophysics*, 2007, 441: 67–84.

[13] Yakubchuk A. Architecture and mineral deposit settings of the Altaid orogenic collage: a revised model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23: 761–779.

[14] Levashova N M, Mikolaichuk A V, McCausland P J A, et al. Devonian paleomagnetism of the North Tien Shan: Implications for the middle– Late Paleozoic paleogeography of Eurasia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 257: 104–120.

[15] Collins W J. Slab pull, mantle convection, and Pangean assembly and dispersal[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 205: 225–237.

[16] 王清晨, 孙枢, 李继亮, 等. 秦岭的大地构造演化[J]. *地球科学*, 1989, 2: 129–142.

Wang Qingchen, Sun Shu, Li Jiliang, et al. The tectonic evolution of Qinglin mountain belt[J]. *Earth Sciences*, 1989, 2: 129–142(in Chinese with English abstract).

[17] 陈衍景. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用[J]. *中国地质*, 2010, 37(4): 854–865.

Chen Yanjing. Indosinian tectonic setting, magmatism and metallogenesis in Qinling Orogen, central China[J]. *Geology in China*, 2010, 37(4): 854–865(in Chinese with English abstract).

[18] 李锦轶. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变[J]. *地质论评*, 2004, 50(3): 304–322.

Li Jinyi. Late Neoproterozoic and Paleozoic tectonic framework and evolution of eastern Xinjiang, NW China[J]. *Geological*

- Review, 2004, 50(3): 304–322(in Chinese with English abstract).
- [19] 林彦蒿, 张泽明, 贺振宇, 等. 中天山北缘华力西期造山作用——变质岩锆石 U–Pb 年代学限定[J]. 中国地质, 2011, 38(4): 820–828.  
Lin Yanhao, Zhang Zeming, He Zhenyu, et al. Variscan orogeny of Central Tianshan Mountains: Constrains from zircon U–Pb chronology of high–grade metamorphic rocks[J]. *Geology in China*, 2011, 38(4): 820–828(in Chinese with English abstract).
- [20] 孙德有, 吴福元, 李惠民, 等. 小兴安岭西北部造山后 A 型花岗岩的时代及与索伦山—贺根山—扎赉特碰撞拼合带东延的关系[J]. 科学通报, 2000, 45(20): 2217–2222.  
Sun Deyou, Wu Fuyuan, Li huimin, et al. Times of A–type granites in Northwest Xiaoxing'anling post–orogenic and connection with the eastward extension of Suolunshan – Hegenshan – Zhalai collisional belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45 (20): 2217–2222(in Chinese).
- [21] 葛肖虹, 刘俊来, 任收麦, 等. 中国东部中—新生代大陆构造的形成与演化[J]. 中国地质, 2014, 41(1): 19–38.  
Ge Xiaohong, Liu Junlai, Ren Shoumai, et al. The formation and evolution of the Mesozoic—Cenozoic continental tectonics in eastern China[J]. *Geology in China*, 2014, 41(1): 19–38(in Chinese with English abstract).
- [22] GPMDB. 全球古地磁数据库. 2004.  
GPMDB. Global Paleomagnetic Database. 2004.
- [23] 黄宝春, 周桃秀, 朱日祥. 从古地磁研究看中国大陆形成与演化过程[J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 349–359.  
Huang Baochun, Zhou Yaoliu, Zhu Rixiang. Discussions on Phanerozoic evolution and formation of continental China, based on paleomagnetic studies[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15 (3): 349–359(in Chinese with English abstract).
- [24] 朱日祥, 杨振宇, 吴汉宁, 等. 中国主要地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动[J]. 中国科学, 1998, 28: 1–16.  
Zhu Rixiang, Yang Zhenyu, Wu Hannin, et al. Phanerozoic apparent polar wander curve and plot movement of Chinese Main Continents[J]. *Science in China*, 1998, 28: 1–16(in Chinese).
- [25] 易治宇, 乔庆庆, 黄宝春. 西准噶尔晚古生代古地磁初步结果及其对古亚洲洋封闭时限的制约[J]. 中国地球物理, 2011: 186.  
Yi Zhiyu, Qiao Qingqing, Huang Baochun. Paleomagnetic study of the late Paleozoic rocks, western Junggar, China: constraints to the timing of closure of the Paleo–Asian Ocean[J]. *Chinese Geophysics*, 2011: 186(in Chinese).
- [26] 李朋武, 张世红, 高锐, 等. 内蒙古中部晚石炭世—早二叠世古地磁新数据及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(1): 423–440.  
Li Pengwu, Zhang Shihong, Gao Rui, et al. Late Carboniferous—Early Permian paleomagnetic data and its geological significance in central Inner Mongolia [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42 (1): 423–440(in Chinese with English abstract).
- [27] 方大钧, 沈忠悦, 王朋岩. 塔里木地块古地磁数据表[J]. 浙江地学学报, 2001, 28(1): 92–99.  
Fang Dajun, Shen Zhongyue, Wang Pengyan. Tarim Block paleomagnetic data sheet [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2001, 28 (1): 92–99(in Chinese with English abstract).
- [28] Lawver L A, Grantz A, Gahagan L M. Plate kinematic evolution of the present Arctic region since the Ordovician[C]//Miller E L, Grantz A, Klemperer S L (eds.). *Tectonic Evolution of the Bering Shelf–ChukchiSea–Arctic Margin and Adjacent Landmasses. Special Paper of Geological Society of America*, Boulder, 2002: 333–358.
- [29] Courtillot V, Davaille A, Besse J, et al. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 205(3): 295–308.
- [30] Nikishin A M, Ziegler P A, Stephenson R A, et al. Late Precambrian to Triassic history of the East European Craton: dynamics of sedimentary basin evolution[J]. *Tectonophysics*, 1996, 268: 23–63.
- [31] Kuzmin M I, Yarmolyuk V V, Kravchinsky V A. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province [J]. *Earth–Science Reviews*, 2010, 102: 29–59.
- [32] IHS. Global basin database. 2009.
- [33] Chumakov N M, Zharkov M A. Climate during Permian–Triassic Biosphere Reorganizations Article 1: Climate of the Early Permian[J]. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2002, 10(6): 586–602.
- [34] Blakey R C. Gondwana paleogeography from assembly to breakup—A 500 my odyssey[C]//Resolving the Late Paleozoic Ice Age in Time and Space. *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.*, 2008, 441: 1–28.
- [35] Nance R D, Brendan J M, Santosh M. The supercontinent cycle: a retrospective essay [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 4–29.
- [36] 赵彦彦, 郑永飞. 全球新元古代冰期的记录和时限[J]. 岩石学报, 2011, 27(2): 545–565.  
Zhao Yanyan, Zheng Yongfei. Record and time of Neoproterozoic glaciations on Earth [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(2): 545–565(in Chinese with English abstract).
- [37] Warren J K. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits[J]. *Earth–Science Reviews*, 2010, 98: 217–268
- [38] 阎国翰, 蔡剑辉, 任康绪, 等. 华北克拉通板内拉张性岩浆作用与三个超大陆裂解及深部地球动力学[J]. 高校地质学报, 2007, 13(2): 161–174.  
Yan Guohan, Cai Jianhui, Ren Kangxu, et al. Intraplate extensional magmatism of North China craton and break–up of three supercontinents and their deep dynamics[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(2): 161–174(in Chinese with English abstract).
- [39] Nance R D, Brendan J M, Santosh M. The supercontinent cycle: A retrospective essay[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 4–29.