论文

华北陆块中奥陶世绝对位置探讨

王洪浩*, 李江海, 张华添, 许丽, 李维波

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

* E-mail: whhpeking@163.com

收稿日期: 2015-06-09; 接受日期: 2015-09-22; 网络版发表日期: 2015-12-21

国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2009CB219302)资助

摘要 “慢柱生成带理论”认为现今的热点以及显生宙经过古板块重建后的板块上的大岩浆岩省和金伯利岩岩体的位置大致位于大剪切波低速省在地表投影的边缘. 在板块上具有可识别且年代确定的大岩浆岩省或金伯利岩岩体时, 可依据“慢柱生成带理论”对板块的绝对位置进行恢复. 本文在前人对华北陆块中奥陶世金伯利岩岩体研究的基础上, 对华北陆块中奥陶世的古地磁数据进行分析 and 筛选, 并结合前期奥陶纪的全球古板块再造及全球构造格局研究, 辅以岩相生物古地理分析, 将华北陆块中奥陶世的绝对位置确定为: 纬度在约 $16.6^{\circ}\sim 19.1^{\circ}\text{S}$, 经度在约 10°W . 在地理位置上位于西伯利亚和冈瓦纳大陆之间, 靠近西伯利亚板块. 且在寒武纪-奥陶纪, 华北陆块在经向上具有逐渐远离冈瓦纳大陆并向西伯利亚板块靠拢的趋势.

关键词 华北陆块, 中奥陶世, 绝对位置, 慢柱生成带理论

1 引言

华北陆块作为中国三大板块之一(黄汲清等, 1977; 任纪舜等, 1999; 潘桂棠等, 2009), 研究其早古生代的绝对位置对于研究华北陆块的早古生代的运动方式、中国陆块群的构造演化以及华北陆块与冈瓦纳大陆的亲缘关系都有着重要的意义. 对于古板块再造, 海底磁条带异常及全球热点分布基本可以制约中生代以后全球板块的构造格局(Heirtzler等, 1968; Ruiz-Martínez等, 2012), 中生代之前板块位置的恢复主要依赖于古地磁手段(Irving, 1964). 但单一时间节点的古地磁数据在古板块再造时有其局限性,

即只能恢复板块的古纬度和方位角, 对于古板块的经度不能给出制约. 前人在进行古板块再造时对于古板块的经度的制约多基于板块地层对比及构造热事件之间的联系(Li等, 2008; Collins和Pisarevsky, 2005; Golonka, 2011).

国际上新近论证的“慢柱生成带理论”(Plume Generation Zones Theory)为恢复板块的绝对位置提供了新的视角. 其基本思路是通过地球物理方法证明全球热点基本上位于SMEAN模型中地幔大剪切波低速省在地表投影的边缘(Burke等, 2008; Burke和Torsvik, 2004; Becker和Boschi, 2002), 而板块上的大岩浆岩省及金伯利岩岩体是热点在地表的反映, 研究

中文引用格式: 王洪浩, 李江海, 张华添, 许丽, 李维波. 2016. 华北陆块中奥陶世绝对位置探讨. 中国科学: 地球科学, 46: 57-66, doi: 10.1360/N072014-00564

英文引用格式: Wang H H, Li J H, Zhang H T, Xu L, Li W B. 2016. The absolute paleoposition of the North China Block during the Middle Ordovician. Sci China Earth Sci, doi: 10.1007/s11430-015-5210-7

表明通过真极移校正的地幔大剪切波低速省在显生宙基本没有发生变化(Torsvik等, 2006, 2008; Torsvik和Cocks 2013), 故可以通过板块上显生宙各个时代的大岩浆岩省或金伯利岩在当时应该处于地幔低速省在地表投影的边缘来制约板块的绝对经度. 结合相关时代的古地磁学研究, 可以恢复板块的绝对位置.

“幔柱生成带理论”研究板块的绝对位置要求板块上有可识别且年代确定的大岩浆岩省或金伯利岩岩体. 关于中国陆块群中生代之前绝对位置的研究, Torsvik等(2008)基于“幔柱生成带理论”并结合峨眉山大火山岩省的研究对扬子陆块晚二叠世(约258 Ma)的绝对位置给出了制约(Torsvik等, 2008); 傅臣建等(2013)通过塔里木大火山岩省对塔里木陆块早二叠世(约290 Ma)的绝对位置进行了探讨; 而目前对华北陆块古生代绝对位置的研究目前尚属空白.

前人对华北陆块中奥陶世金伯利岩岩体同位素测年的研究(约465 Ma)(张宏福和杨岳衡, 2007)使得通过“幔柱生成带理论”研究华北陆块的绝对位置成为可能. 在此基础上, 本文对发表的华北陆块中奥陶世的古地磁数据进行分析和筛选, 并结合奥陶纪全球古板块再造研究(李江海等, 2014)及岩相、生物古地理分析, 来探讨华北陆块中奥陶世的绝对位置, 并通过运动学特征分析, 来探讨华北陆块早古生代的运动方式.

2 “幔柱生成带理论”基本原理

“幔柱生成带理论”是近10年来深部地质学研究的热点问题之一, 该理论认为全球现今热点及显生宙经过古板块重建后的板块上的大岩浆岩省和金伯利岩岩体的位置大致位于核幔边界附近(深度约2800 km)大剪切波低速省(large low shear wave velocity provinces, LLSVPs)在地表投影的边缘(Burke等, 2008; Burke和Torsvik, 2004; Becker和Boschi, 2002; Torsvik等, 2006, 2008; Torsvik和Cocks, 2013). 上述2800 km深度大剪切波低速省的边界被称作幔柱生成带(Plume Generation Zones, PGZs), 被认为和热点、大岩浆岩省和金伯利岩的成因具有一定的联系. 尽管该理论目前仅仅给出了现象表述, 具体的理论机制有待进一步研究, 但该理论却在板块构造理论的框架下, 建立了地球深部核幔边界与地表热点、大岩

浆岩省及金伯利岩岩体之间的空间位置关系(Torsvik等, 2010), 并为古板块绝对位置的研究提供了一种新的视角(Torsvik等, 2008).

地震技术的发展促进了学界对于地球深部结构的研究. 地球深部地震波速的异常, 反映了深部物质的不均一性, 基于地震层析成像的方法, 地球物理学家认为在核幔边界2800 km处, 剪切波存在0.6%异常和-1.6%异常两个频率的峰值, 通常选取二者的中间值-1%作为剪切波低速省(low shear wave velocity provinces)的边界, 其中围限的范围即剪切波低速省(Burke等, 2008). 现今全球范围内存在两个大剪切波低速省, 二者均为全球尺度, 分别位于现今非洲板块和太平洋板块之下, 几乎呈对跖关系. 大剪切波低速省的范围从2800 km向上范围逐渐变小直至尖灭, 图1展示了SMEAN模型中2800 km大剪切波低速省的形态(Becker和Boschi, 2002). 目前主要的大剪切波低速省模型有SMEAN模型(Becker和Boschi, 2002)、CASTLE模型(Castle等, 2000)、KUO模型(Kuo等, 2000)、NGRAND模型(Grand, 2002)、S20RTS模型(Ritsema和Van Heijst, 1999)和SB4L18模型(Masters等, 2000)等. 上述模型的区别主要在于使用数据库及计算方法的不同, 在结果上区别不大.

在核幔边界剪切波低速省研究的基础上, Torsvik等进一步探讨地表幔源热点、大岩浆岩省、以及金伯利岩岩体在地表的分布与上述核幔边界剪切波低速省位置的空间关系(Torsvik等, 2006, 2008, 2010; Torsvik和Cocks, 2013). Torsvik等(2008)详细对比了前人的典型8种大剪切波低速带的形态模型, 认为由于各个模型之间大剪切波低速省的形态和位置差别不大, 故上述“幔柱生成带理论”对于各个模型都适用, 仅存在地幔生成带与现今热点、经过古板块恢复的大岩浆岩省及金伯利岩体位置之间吻合度大小的问题, 其中SMEAN模型2800 km处地幔生成带(剪切波速-1%异常带的边缘)与现今幔源热点以及经过古板块重建后的板块上的大岩浆岩省和金伯利岩岩体的位置吻合度最高(Torsvik等, 2008)(图1). 虽然经过古板块重建后板块上的金伯利岩岩体与上述异常带边缘的吻合度只有80%, 但却初步提供了一种可以确定板块绝对位置的方法(Torsvik等, 2010).

关于大剪切波低速省存在的时限问题, Burke等(2008)推测大剪切波低速省的成因可能与地球深部

图1 全球现今幔源热点及重建后的大岩浆岩省、金伯利岩岩体与SMEAN模型大剪切波低速省的关系图

据 Burke 等(2008), Burke 和 Torsvik(2004), Becker 和 Boschi(2002), Torsvik 等(2006, 2008, 2010), Torsvik 和 Cocks(2013)

的物质组成有关, 存在时间可能长达2.5 Ga(Burke等, 2008). Torsvik等基于130 Ma以来经过海底磁条带异常校正的板块绝对位置的研究及研究较为深入的泛大陆上大岩浆岩省、金伯利岩体的分布研究认为大剪切波低速省在300 Ma以来确定存在且形态保持稳定(Torsvik等, 2008, 2010). Torsvik等最新的研究认为, 在对显生宙冈瓦纳大陆进行板块重建的过程中, 重建后冈瓦纳板块上144个金伯利岩岩体的位置与经过真极移较真的幔柱生成带的平均距离差为 $4.5^{\circ} \pm 4.7^{\circ}$. 基于统计规律, 基本上可以认为大地幔低速省在显生宙稳定存在, 但在具体操作的过程中, 需要考虑到显生宙以来多次真极移的影响, 需要对幔柱生成带按照全球板块真极移的程度进行坐标系变换(Torsvik和Cocks, 2013; Torsvik等, 2014).

基于上述思路并结合相关的古地磁研究, 可以对部分板块特定时间的绝对位置给出制约. 特定时间节点的古地磁数据可以制约板块的古纬度及方位角, 若该板块上有时代明确的大岩浆岩省或金伯利岩岩体, 可以通过“幔柱生成带理论”对板块可能的经度给出限制, 从而获得板块的绝对位置. 但由于全球板块在古生代期间发生了多次真极移, 在对古生

代板块通过“幔柱生成带理论”进行重建时, 需要考虑真极移的影响, 对幔柱生成带按照全球板块真极移的程度进行坐标系变换, 再按照上述思路进行古板块再造.

3 “幔柱生成带理论”对华北陆块中奥陶世位置制约

基于“幔柱生成带理论”研究板块的绝对位置要求板块上有可识别且年代确定的大岩浆岩省或金伯利岩岩体, 且该方法主要应用于古生代板块的绝对位置研究(前寒武纪地幔剪切波低速省的形态未知, 而中生代以后板块位置受控于海底磁条带异常, 基本固定).

华北陆块金伯利岩岩浆活动主要分为三个时期: (1) 中元古代金伯利岩和钾镁煌斑岩岩浆活动期, 以山西阳高岩区为代表; (2) 早古生代金伯利岩岩浆活动期, 以辽宁铁岭岩区、复县岩区和山东蒙阴岩区为代表; (3) 中-新生代金伯利岩岩浆活动期, 以河南鹤壁岩区和涉县岩区为代表(路凤香和赵磊, 1995).

蒙阴金伯利岩岩区分布在太古代冀鲁辽陆核的

南部, 由许多小的不规则岩管或岩脉组成, 金伯利岩绝大多数侵入到太古界泰山群花岗片麻岩中, 少数侵入到古生代石灰岩中(Dobbs等, 1994). 岩性主要由粗晶斑状金伯利岩、细粒金伯利岩和金伯利角砾岩组成. 复县金伯利岩区分布在太古代冀鲁辽陆核的辽东半岛上, 该金伯利岩岩区主要侵入到晚元古代沉积地层中, 岩性主要由粗晶斑状金伯利岩和角砾状金伯利岩组成, 含少量的细粒金伯利岩(董振信, 1994; 池际尚, 1996).

基于对辽宁复县和山东蒙阴金伯利岩中的金云母巨晶进行Ar-Ar同位素定年研究, 认为山东蒙阴和辽宁复县两地的金伯利岩具有一致的侵位年龄, 约(465±2) Ma(张宏福和杨岳衡, 2007), 且该结果与前人发表的金伯利岩岩管中钙钛矿的U-Pb年龄(Dobbs等, 1994)及金伯利岩中金云母的Rb-Sr等时线年龄(Lu等, 1998)相一致. 这为通过“幔柱生成带理论”探讨华北陆块中奥陶世的绝对位置提供了良好的契机.

相关时代的古地磁数据是进行古板块再造的基础, 依据V90标准(Van der Voo, 1990), 筛选出品质因子 $Q \geq 3$ 的中奥陶世华北陆块古地磁数据(表1). 在依据单一时间节点的古地磁数据对板块进行再造时, 会有选择北极点或者南极点进行投影的问题, 二者的投影结果在纬度上相对赤道对称, 但在板块的方位角上相差180°. 本文中筛选的数据, 如采用北极点进行投影, 板块位置基本位于南半球低纬度; 如采用南极点进行投影, 板块位置基本位于北半球低纬度. 前人基于对于华北陆块视极移曲线的研究认为华北陆块在志留纪-泥盆纪位于北半球低纬度, 方位角和现今方位角类似(黄宝春等, 2000, 2008; Lin等, 1985). 如采用南极点对华北陆块的古地磁数据进行投影, 华北陆块中奥陶世-志留纪虽然在纬度上变化不大, 但在短时间内方位角却存在约180°的旋转, 这在地

质上是难以解释的. 采用北极点进行投影, 则体现出华北陆块向北漂移的过程, 符合地质规律.

故本文统一选取北极点投影, 以(35°N, 110°E)为华北陆块的参考点(黄宝春等, 2000), 对中奥陶世华北陆块的古纬度及方位角进行再造(图2), 从表1和图2可以看出, 数据1得到华北陆块中奥陶世的古纬度相对其他组结果差别较大, 可能与采样点的数量较少有关(1个采样点), 而剩下的4组数据得到的纬度值有重叠区间. 基于统计规律, 本文认为2~5组数据分别得到的华北陆块古纬度的重叠区间最有可能代表华北陆块参考点在465 Ma的古纬度, 即16.6°~19.1°S(图2中紫色最深的区域).

“幔柱生成带理论”认为经过古板块再造后板块上金伯利岩岩体的位置位于经过真极移校正的SMEAN模型2800 km深度地幔剪切波速-1%异常带在地表投影的边缘. 古地磁确定的华北陆块的古纬度与465 Ma经过真极移校正的地幔低速省在地表的投影(据Torsvik等(2013))共有8个交点(图2). 从中筛选出华北陆块中奥陶世的绝对位置, 还需要基于板块漂移速率、构造及生物古地理的等条件的制约.

在上述研究的基础上, 综合考虑西伯利亚、华北、华南、塔里木及澳大利亚板块显生宙视极移曲线. 筛选出各板块品质因子 $Q \geq 3$ 的古地磁数据(华北、华南、塔里木陆块古地磁数据据黄宝春等(2008); 西伯利亚板块数据据Metelkin等(2011); 澳大利亚板块数据据Torsvik等(2012)). 采用“球面样条法”(spherical spline theory)(Buss和Fillmore, 2001; Jupp和Kent, 1987; Torsvik等, 1996), 选择 Q 值为加权值, 以300为样条的参数, 拟合出上述板块的显生宙视极移曲线(图3).

从上述视极移曲线中可以看出, 早古生代华北陆块的视极移曲线呈现一个较大的顺时针弧度, 与

表1 筛选出的中奥陶世华北陆块古地磁数据表

编号	时代	岩性	古地磁极纬度(°)	古地磁极经度(°)	α_{95}	古纬度(°)	参考文献
1	O ₂	石灰岩	43.2	332.5	10.6	-2.7±5.5	Lin等, 1985
2	O ₂	石灰岩	27.9	310.4	9.2	-24.2±7.6	杨振宇等, 1998
3	O ₂	石灰岩	31.5	327.7	7.0	-14.7±4.4	Huang等, 1999
4	O ₁₋₂	白云岩	28.8	310.9	12.3	-23.2±10.3	Zhao等, 1992
5	O ₁₋₂	石灰岩	31.8	326.5	9.5	-14.9±6.1	黄宝春等, 2000

图2 华北陆块中奥陶世绝对位置再造图

全球板块位置据李江海等(2014)和 Torsvik 等(2012)修改, 真极移校正后的地幔低速省边界据 Torsvik 等(2013)

上述扬子、塔里木、西伯利亚及澳大利亚板块早古生代的视极移曲线形态差距较大, 通过欧拉旋转也很难将华北陆块早古生代的视极移曲线和上述板块早古生代的视极移曲线拟合在一起。由此可以推断, 华北陆块在早古生代与上述板块之间没有直接相连, 很可能在大洋中孤立漂移。

4 地质因素对华北陆块中奥陶世位置的制约

探讨华北陆块中奥陶世的绝对位置, 需要建立在奥陶纪全球构造格局的基础上。奥陶纪是全球板块进行重组的重要阶段(李江海等, 2014), 全球构造格局主要可以概括为三点: (1) 冈瓦纳大陆在奥陶纪顺时针旋转, 其西北缘的塔里木、扬子等陆块相继从冈瓦纳大陆裂离; (2) 劳伦大陆(Laurentia)、波罗的板块(Baltica)、阿瓦隆尼亚陆块(Avalonia)开始聚合, 并于早-中志留世形成劳俄大陆(Laurussia); (3) 西伯利亚板块(Siberia)孤立漂移(图2)。

相对于寒武纪, 奥陶纪冈瓦纳大陆开始顺时针旋转, 旋转方向调整的同时伴随着东冈瓦纳边缘岩

浆弧的后退, 造成古太平洋新的边缘海张开(李江海等, 2014)。早奥陶世大陆的澳洲-南极大陆边缘因俯冲形成岛弧及一系列褶皱及冲断带, 并伴随着大量的火山活动(Findlay, 1991)。冈瓦纳西北缘的塔里木、扬子等陆块在中奥陶世之后相继从冈瓦纳裂离(王洪浩等, 2013)。

劳俄大陆的形成主要涉及三个板块: 劳伦板块、波罗的板块以及冈瓦纳北缘的阿瓦隆尼亚地体。早奥陶世, 莱茵洋(Rheic)开始发育, 阿瓦隆尼亚地体从冈瓦纳北缘裂解, 持续北漂, 并向波罗的板块斜向俯冲。晚奥陶世-早志留世, 阿瓦隆尼亚地体和波罗的板块之间的通奎斯特洋(Tornquist)闭合, 二者发生碰撞。与此同时, 莱茵洋的扩张和亚皮特斯洋(Iapetus)的消减是同步的, 波罗的板块和阿瓦隆尼亚地体拼合后, 整体上向劳伦板块俯冲, 最终在早-中志留世, 亚皮特斯洋闭合, 劳伦板块与波罗的板块以及阿瓦隆尼亚地体发生碰撞, 形成劳俄大陆, 并在现今的北美东部形成加里东期的阿巴拉契亚造山带, 在劳伦与波罗的板块之间形成加里东期的斯堪的纳维亚造山带(Nance等, 2012; Roberts, 2003; Soper等, 1992)。

图3 华北、扬子、塔里木、西伯利亚及澳大利亚板块显生宙视极移曲线

据黄宝春等(2008)、Metelkin 等(2011)和 Torsvik 等(2012)

从图2中可以看出, 基于“幔柱生成带理论”和古地磁数据确定的华北陆块中奥陶世可能的8个位置中, 位置③被劳伦大陆占据, 位置⑤~⑦被冈瓦纳大陆占据。由于板块在空间上不可能重叠, 故华北陆块的绝对位置仅能从剩下的位置中筛选。

对于位置①和②, 学界一直有关于华北陆块和劳伦大陆亲缘性的讨论。大量的生物古地理、构造热事件证据表明华北陆块、北美板块和西伯利亚板块在

中-新元古代相连(王荃, 2011, 2012; Li等, 2008; Zhang等, 2006)。王荃(2011, 2012)基于岩相和生物古地理对比认为, 直到晚奥陶世之前, 华北陆块仍未与北美板块分离(王荃, 2011, 2012), 位置①和②似乎是中奥陶世华北陆块位置的必然选择。但综合考虑西伯利亚板块沉积特征, 发现华北陆块奥陶系的浅海台地相碳酸盐岩沉积以及暖水型的牙型石和头足类, 不仅可以与北美板块进行对比, 而且与西伯利亚板

块的相似性也很高(安太庠等, 1983; 赖才根, 1982). 此外, Zhang等(2006)和Li等(2008)基于大量古地磁数据认为华北陆块的与劳伦板块的视极移曲线在615 Ma发生分离, 华北板块在新元古代末期已从劳伦大陆裂解(Zhang等, 2006; Li等, 2008). 故不能简单的将华北陆块中奥陶世的位置限定在①和②.

在对单一时间节点的古板块进行再造时, 还要综合考虑古板块与前、后阶段该板块位置的连续性以及板块漂移运动速率是否合理的问题. 若位置①, ②以及⑧, 则华北和扬子、塔里木陆块之间距离很远, 且中间隔有劳伦大陆、冈瓦纳大陆等大板块, 华北陆块在古生代期间跨域全球型的大陆漂移半个地球与华南陆块和塔里木陆块完成对接, 这种现象是无法解释的, 在地质历史时期也没有类似的案例, 故认为位置①, ②和⑧均不是华北陆块中奥陶世绝对位置的最佳选择.

基于沉积盆地岩性对比和前人研究进展(冯增昭等, 2003; 2004; 李江海等, 2014; Golonka, 2011), 本文绘制了西伯利亚板块、华北陆块、扬子陆块及澳洲板块中奥陶世岩相古地理图(图4). 从图中可以看出, 上述板块相关盆地早古生代岩性具有较大的相似性, 沉积相基本以稳定浅海台地相为主, 发育大量厚层碳酸盐岩, 并可见少量的泥页岩夹层, 在西伯利亚板块的通古斯盆地、利纳-维柳伊盆地及澳大利亚的坎宁盆地可见早古生代蒸发盐岩沉积. 上述盆地在古生代基本上属于热带、亚热带气候, 与上述板块再造结果基本吻合.

与此同时, 华北陆块的早古生代的沉积特征具有一定的独特性. 中奥陶世末期, 华北陆块整体发生加里东期构造抬升, 盆地内部普遍缺少下奥陶统-志留系沉积. 而上述其他盆地奥陶系-志留系基本完整. 沉积相特征表明华北陆块与上述板块在早古生代早期相距较近, 但到中奥陶世末期, 华北陆块与上述陆块之间应存在一定的距离.

华北陆块的早古生代生物古地理研究认为, 华北陆块中-晚寒武世古生物以底栖非球接子类三叶虫强烈分异为特征, 代表种类有 *Damesella*, *Crepicephalina*, *Taitzia*, *Lurenzella*, *Sunaspis*等, 在生物地理分区上属于亚澳生物大区, 但与扬子陆块属于不同的生物省(王鸿祯等, 1990). 表明华北陆块在中-晚寒武世与澳大利亚具有一定的亲缘性, 但并不与扬子

陆块相连. 至中奥陶世, 华北陆块和扬子陆块、澳大利亚板块已分属不同的生物古地理大区, 华北陆块更接近西伯利亚生物古地理大区(王鸿祯等, 1990). 华北奥陶系牙形石具有暖水型动物群的特征, 亮甲山组和下马家沟组的 *Serratognathus*, *Bergstroemognathus*, *Rhipidognathus*, *Histiodella*, *Belodina*, 上马家沟组的 *Pleotodina*, *Phragmodus* 以及峰峰组的 *Tasmonognathus* 等显示出华北陆块在中奥陶统与西伯利亚地台在生物古地理上具有密切的联系(汪啸凤和陈孝红, 1999). 安太庠等(1983)基于牙形石生物古地理及碳酸盐沉积相研究, 也认为奥陶系华北与西伯利亚的亲缘性高于亚澳大区.

奥陶纪华北陆块头足类以暖水型动物群为主, 下奥陶统治里组以 *Ellesmeroceratidae* 和 *Bassleroceratidae* 为代表, 亮甲山组以 *Manchuroceratids* 为代表, 马家沟组以珠角石动物群为特色, 主要属种有 *Armenoceras* 等, 峰峰组以产 *Fengfenggoceras* 为代表. 头足动物类型与西伯利亚板块和澳大利亚板块均具有一定的相似性, 但与华南陆块和塔里木陆块差异较大(赖才根, 1982). 华南陆块和塔里木陆块主要发育有冷水型头足类, 可能受到了寒流的扰动作用. 也表明华北陆块在奥陶纪与华南陆块在古地理位置上存在一定的距离, 和西伯利亚亲缘性较强.

上述岩相及生物古地理研究整体反映了华北陆块寒武纪-奥陶纪逐渐远离冈瓦纳大陆并向西伯利亚板块靠拢的过程. 且位置④能够很好地解释华北陆块后期与华南陆块及塔里木陆块拼合的过程. 因此, 位置④是华北陆块中奥陶世最合适的位置. 即纬度在约 $16.6^{\circ}\sim 19.1^{\circ}\text{S}$, 经度在约 10°W . 在地理位置上位于西伯利亚板块和冈瓦纳大陆之间, 靠近西伯利亚板块.

5 讨论和结论

(1) 利用“幔柱生成带理论”研究板块的绝对位置要求板块上有可识别且年代确定(显生宙)的大岩浆岩省或金伯利岩岩体. 前人对于华北陆块465 Ma金伯利岩岩体的研究为探讨华北陆块中奥陶世的绝对位置提供了契机. 基于华北陆块中奥陶世古地磁数据的筛选, 认为华北陆块在中奥陶世的纬度约在 $16.6^{\circ}\sim 19.1^{\circ}\text{S}$.

图 4 西伯利亚板块、华北陆块、扬子陆块、塔里木陆块及澳洲板块中奥陶世岩相古地理图

据冯增昭等(2003, 2004)、李江海等(2014)和 Golonka(2011)

(2) 基于“幔柱生成带理论”, 古地磁数据确定的华北陆块的古纬度与经过真极移校正的“幔柱生成带理论”的交点即华北陆块中奥陶世的绝对位置. 在 8 个交点中, 4 个已被劳伦大陆或冈瓦纳大陆占据. 3 个交点不符合板块运动规律. 结合岩相、生物古地理分析, 将华北陆块中奥陶世最合理的绝对位置确定为:

纬度在约 $16.6^{\circ}\sim 19.1^{\circ}\text{S}$, 经度在约 10°W . 在地理位置上位于西伯利亚板块和冈瓦纳大陆之间, 靠近西伯利亚板块.

(3) 生物古地理分析表明, 华北陆块在中-晚寒武世与澳大利亚板块亲缘性较强, 在中奥陶世与西伯利亚板块亲缘性较强. 在寒武纪-奥陶纪, 华北陆

块在经向上可能存在远离澳大利亚板块、向西伯利亚板块靠拢的运动方式。

(4) “幔柱生成带理论”虽然给出了一种研究中奥陶世华北陆块绝对位置的方法, 但“幔柱生成带”与地表现今热点、经过古板块恢复的大岩浆岩省及金伯利岩体位置的耦合机制、“幔柱生成带”在统计学规律上长期保持稳定的原因等重要问题还有待进一步研究和讨论。

致谢 成文过程中得到了北京大学黄宝春教授、美国佛罗里达大学Joseph G Meert教授及北京大学地球与空间科学学院刘仲兰等帮助, 在此表示感谢。

参考文献

- 安太庠, 张放, 向维达, 张又秋, 徐文豪, 张慧娟, 姜德标, 杨长生, 蒯连弟, 崔占堂, 杨新昌. 1983. 华北及邻区牙形石. 北京: 科学出版社. 223
- 池际尚. 1996. 中国原生金刚石成矿地质条件研究. 武汉: 中国地质大学出版社. 144
- 董振信. 1994. 中国金伯利岩. 北京: 科学出版社. 318
- 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 鲍志东. 2003. 中国中奥陶世岩相古地理. 古地理学报, 5: 263–278
- 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 蒋盘良, 鲍志东, 罗璋, 鞠天吟, 田海芹, 汪红. 2004. 中国南方中及晚奥陶世岩相古地理. 古地理学报, 3: 10–24
- 傅臣建, 李江海, 毛翔. 2013. 早二叠世塔里木陆块的经度: 来自大火成岩省的制约. 地球物理学报, 56: 3061–3070
- 黄宝春, 周姚秀, 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: 348–359
- 黄宝春, 朱日祥, Otofuj Y, 杨振宇. 2000. 华北等中国主要地块早古生代早期古地理位置探讨. 45: 337–345
- 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 张之孟, 许志琴. 1977. 中国大地构造基本轮廓. 地质学报, 51: 117–135
- 赖才根. 1982. 中国地层: 中国的奥陶系. 北京: 地质出版社. 297
- 李江海, 王洪浩, 李维波, 周肖贝. 2014. 显生宙全球古板块再造及构造演化. 石油学报, 35: 207–218
- 路凤香, 赵磊. 1995. 华北地台金伯利岩岩浆活动时代讨论. 岩石学报, 11: 365–374
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分. 中国地质, 26: 1–4
- 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 姜春发, 牛宝贵, 李锦轶, 谢广连, 和政军, 刘志刚. 1999. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明. 北京: 地质出版社. 50
- 汪啸风, 陈孝红. 1999. 中国奥陶纪古生物地理与古气候. 见: 中国地质科学院地层古生物论文集编委会, 主编. 地层古生物论文集(第二十七辑). 北京: 地质出版社. 003: 1–27
- 王洪浩, 李江海, 杨静懿, 周肖贝, 傅臣建, 李文山. 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: 637–647
- 王鸿祯, 杨森楠, 刘本培. 1990. 中国及邻区构造古地理和生物古地理. 武汉: 中国地质大学出版社. 336
- 王荃. 2011. 华北克拉通与全球构造. 地质通报, 31: 1–18
- 王荃. 2012. 中朝古陆的解体与华北、华泰二克拉通的确立. 地质学报, 86: 1553–1568
- 杨振宇, 马醒华, 孙知明, 黄宝春, 周姚秀. 1998. 华北地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动. 中国科学 D辑: 地球科学, 28: 44–56
- 张宏福, 杨岳衡. 2007. 华北克拉通东部含金刚石金伯利岩的侵位年龄和Sr-Nd-Hf同位素地球化学特征. 岩石学报, 23: 285–294
- Becker T W, Boschi L. 2002. A comparison of tomographic and geodynamic mantle models. *Geochem Geophys Geosyst*, doi: 10.1029/2001GC000168
- Burke K, Steinberger B, Torsvik T H, Smethurst M A. 2008. Plume generation zones at the margins of large low shear velocity provinces on the core-mantle boundary. *Earth Planet Sci Lett*, 265: 49–60
- Burke K, Torsvik T H. 2004. Derivation of large igneous provinces of the past 200 million years from long-term heterogeneities in the deep mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 227: 531–538
- Buss S R, Fillmore J P. 2001. Spherical averages and applications to spherical splines and interpolation. *ACM T Graphic*, 20: 95–126
- Castle J C, Creager K C, Winchester J P, Van der Hilst R D. 2000. Shear wave speeds at the base of the mantle. *J Geophys Res: Solid Earth* (1978–2012), 105: 21543–21557
- Collins A S, Pisarevsky S A. 2005. Amalgamating eastern Gondwana: The evolution of the Circum-Indian Orogens. *Earth-Sci Rev*, 71: 229–270
- Dobbs P N, Duncan D J, Hu S, Shee S R, Colgan, E A, Brown M A, Smith C B, Allsopp H L. 1994. The geology of the Mengyin kimberlites, Shandong, China. In: Meyer H O A, Leonardos O H, eds. *Proceedings of 5th International Kimberlite Conference. Volume 1. Diamonds: Characterization, Genesis and Exploration*. Brasilia: CPRM. 106–115
- Findlay R H. 1991. Antarctica. In: Moullade M, Naim A E M, eds. *The Phanerozoic Geology of the World*. Amsterdam: Elsevier. 335–407
- Golonka J. 2011. Phanerozoic palaeoenvironment and palaeolithofacies maps of the Arctic region. *Geol Soc London Mem*, 35: 79–129
- Grand S P. 2002. Mantle shear-wave tomography and the fate of subducted slabs. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 360: 2475–2491
- Heirtzler J R, Dickson G O, Herron E M, Pitman W C, Le Pichon X. 1968. Marine magnetic anomalies, geomagnetic field reversals, and motions of the ocean floor and continents. *J Geophys Res*, 73: 2119–2136
- Huang B, Yang Z, Otofuj Y, Zhu R. 1999. Early Paleozoic

- paleomagnetic poles from the western part of the North China Block and their implications. *Tectonophysics*, 308: 377–402
- Irving E. 1964. *Paleomagnetism and Its Application to Geological and Geophysical Problems*. New York: Wiley. 399
- Jupp P E, Kent J T. 1987. Fitting smooth paths to speherical data. *Appl Stat*, 36: 34–46
- Kuo B Y, Garnero E J, Lay T. 2000. Tomographic inversion of *S-SKS* times for shear velocity heterogeneity in *D''*: Degree 12 and hybrid models. *J Geophys Res: Solid Earth* (1978–2012), 105: 28139–28157
- Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, Davidson A, De Waele B, Ernst R E, Fitzsimons I C W, Fuck R A, Gladkochub D P, Jacobs J, Karlstrom K E, Lu S, Natapov L M, Pease V, Pisarevskya S A, Thrane K, Vernikovsky V. 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis. *Precambrian Res*, 160: 179–210
- Lin J, Fuller M, Zhang W. 1985. Preliminary Phanerozoic polar wander paths for the North and South China blocks. *Nature*, 313: 444–449
- Lu F X, Wang Y, Chen M H, Zheng J P. 1998. Geochemical characteristics and emplacement ages of the Mengyin kimberlites, Shandong Province, China. *Int Geol Rev*, 40: 998–1006
- Masters G, Laske G, Bolton H, Dziewonski A. 2000. The relative behavior of shear velocity, bulk sound speed, and compressional velocity in the mantle: Implications for chemical and thermal structure. In: *Earth's Deep Interior: Mineral Physics and Tomography from the Atomic to the Global Scale*. *Geophys Monogr Ser*, 117: 63–87
- Metelkin D V, Vernikovsky V A, Kazansky A Y. 2011. Siberia-from Rodinia to Eurasia. In: Closson D, ed. *Tectonics*. Rijeka: InTech. 103–136
- Nance R D, Gutiérrez-Alonso G, Keppie J D, Linnemann U, Murphy J, Quesada C, Strachan R A, Woodcock N H. 2012. A brief history of the Rheic Ocean. *Geosci Front*, 3: 125–135
- Ritsema J, Van Heijst H J. 1999. Seismic imaging of structural heterogeneity in Earth's mantle: Evidence for large-scale mantle flow. *Sci Prog*, 83: 243–259
- Roberts D. 2003. The Scandinavian Caledonides: Event chronology, palaeogeographic settings and likely modern analogues. *Tectonophysics*, 365: 283–299
- Ruiz-Martínez V C, Torsvik T H, van Hinsbergen D J J, Gaina C. 2012. Earth at 200 Ma: Global palaeogeography refined from CAMP palaeomagnetic data. *Earth Planet Sci Lett*, 331: 67–79
- Soper N J, Strachan R A, Holdsworth R E, Gayer R A, Greiling R O. 1992. Sinistral transpression and the Silurian closure of Iapetus. *J Geol Soc*, 149: 871–880
- Torsvik T H, Burke K, Steinberger B, Webb S J, Ashwal L D. 2010. Diamonds sampled by plumes from the core-mantle boundary. *Nature*, 466: 352–355
- Torsvik T H, Cocks L R M. 2013. Gondwana from top to base in space and time. *Gondwana Res*, 24: 999–1030
- Torsvik T H, Smethurst M A, Burke K, Steinberger B. 2006. Large igneous provinces generated from the margins of the large low-velocity provinces in the deep mantle. *Geophys J Int*, 167: 1447–1460
- Torsvik T H, Smethurst M A, Meert J G, Van der Voo R, McKerrow W S, Brasier M D, Sturt B A, Walderhaug H J. 1996. Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Palaeozoic—A tale of Baltica and Laurentia. *Earth-Sci Rev*, 40: 229–258
- Torsvik T H, Steinberger B, Cocks L R M, Burke K. 2008. Longitude: Linking Earth's ancient surface to its deep interior. *Earth Planet Sci Lett*, 276: 273–282
- Torsvik T H, Van der Voo R, Doubrovine P V, Burke K, Steinberger B, Ashwal L D, Trønne R G, Webb S J, Bull A L. 2014. Deep mantle structure as a reference frame for movements in and on the Earth. *Proc Natl Acad Sci*, 111: 8735–8740
- Torsvik T H, Van der Voo R, Preeden U, Mac Niocaill C, Steinberger B, Doubrovine P V, Van Hinsbergen D J J, Domeier M, Gaina C, Tohver E, Meert J G, McCausland P J A, Cocks L R M. 2012. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics. *Earth Planet Sci Lett*, 114: 325–368
- Van der Voo R. 1990. The reliability of paleomagnetic data. *Tectonophysics*, 184: 1–9
- Zhang S, Li Z X, Wu H. 2006. New Precambrian palaeomagnetic constraints on the position of the North China Block in Rodinia. *Precambrian Res*, 144: 213–238
- Zhao X, Coe R S, Liu C, Zhou Y. 1992. New Cambrian and Ordovician paleomagnetic poles for the North China Block and their paleogeographic implications. *J Geophys Res: Solid Earth* (1978–2012), 97: 1767–1788