

华北地台蓟县系杨庄组古地磁新结果 及其大地构造意义

吴怀春 张世红* 李正祥 李海燕 董进

(中国地质大学(北京) 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 岩石圈构造和探测技术教育部重点实验室, 北京 100083; Tectonics Special Research Centre, School of Earth and Geographical Sciences, The University of Western Australia, Crawley, WA 6009, Australia.

* 联系人, E-mail: shzhang@cugb.edu.cn

摘要 对采自蓟县剖面的蓟县系杨庄组(~1350Ma)紫红色泥质白云岩样品开展了详细的古地磁研究, 成功分离出两个剩磁分量. 低温分量A在地理坐标系下与现代地磁场方向接近, 被解释为重磁化分量. 高温稳定剩磁分量B能够在 99%置信水平上通过褶皱检验(褶皱的时代为中晚侏罗世) 和 95%置信水平上通过倒转检验. 岩石磁学实验表明其携磁矿物为赤铁矿. 其平均方向在构造校正前为 $D/I = 77.6^\circ/-24.3^\circ$ ($\kappa = 5.4$, $\alpha_{95} = 18.3^\circ$), 校正后为 $D/I = 72.2^\circ/11.5^\circ$ ($\kappa = 24.6$, $\alpha_{95} = 7.9^\circ$, $N = 15$), 该分量被解释为原生剩磁. 相应的视磁极位置为(17.3°N, 214.5°E, $dp/dm = 4.1^\circ/8.0^\circ$). 对现有高质量古地磁极拟合结果表明, 华北地台、Laurentia、Baltica和Siberia大陆在 1800~1350 Ma期间保持同一连接方式.

关键词 华北地台 杨庄组 古地磁 中元古代 Rodinia Columbia

不同研究者对前寒武纪华北地台与其他大陆的连接关系曾提出过多种设想^[1~6]. 多数作者认为华北地台与Laurentia, Baltica, Siberia等大陆关系密切^[1~4,6], 但对具体连接方式及其时限一直缺少高质量的古地磁数据检验. 蓟县中新元古界剖面地层出露连续完整, 沉积时限约为 1800~800 Ma, 出露有多套红层, 是开展古地磁研究的理想地区. 前人对该剖面开展过一些古地磁研究^[7~9], 但不同研究者发表的结果之间矛盾很大, 多数结果缺少必要的野外检验. 本文在杨庄组(~1350 Ma)紫红色泥质白云岩中获得的高温稳定剩磁成分能够通过倒转检验和褶皱检验, 被解释为原生剩磁. 这一古地磁新结果为认识这一时期华北地台与其他大陆的连接关系提供了重要证据.

1 区域地质概况和采样

蓟县剖面位于华北地台中东部的蓟县北部山区(图 1(a)), 是我国中新元古界的标准剖面. 该剖面地层出露完整, 构造简单, 变形较弱. 自下而上划分为三个系: 分别为长城系(ca. 1800~1400 Ma)、蓟县系(ca. 1400~1000 Ma)和青白口系(ca. 1000~800 Ma). 杨庄组位于蓟县系的最下部, 主要由紫红色泥质白云岩和灰白色微晶白云岩组成, 与下伏长城系高于庄组平行不整合接触, 与上覆雾迷山组呈整合接触^[10]. 王松山等^[11]对杨庄组上部白云岩燧石条带内捕获气体进行Ar-Ar法定年, 获得的年龄为 1317 ± 22

Ma, 结合从高于庄组和雾迷山组获得的Ar-Ar法年龄, 建议杨庄组的顶底界年龄分别为 1310 ± 20 Ma和 1380 ± 24 Ma. 本次研究的样品主要采自杨庄组 2 段和 3 段底部, 估计采样层位年龄大约为 1350 Ma. 在野外使用轻便手提钻机采样, 磁罗盘和太阳罗盘定向. 在该组紫红色泥质白云岩中共采样 23 个采点, 212 只岩芯样品(图 1(b)).

2 实验室测试和分析方法

所有样品均加工成 2.2 cm长的圆柱状古地磁标准样品. 剩磁测量在中国地质大学(北京) 古地磁实验室的JR-6A旋转磁力仪和中国地质科学院地质力学研究所古地磁实验室的 2G-755R超导磁力仪上进行. 在两个实验室均使用ASC-TD48 热退磁炉进行系统热退磁处理. 磁力仪和热退磁炉均安装在大型Helmholtz线圈内, 线圈中部的磁场强度小于 500 nT. TD48热退磁炉内磁场强度小于 10 nT. 测试的样品进一步保护在磁屏蔽筒内. 低温阶段热退磁的间隔为 50~100 , 高温段为 5~30 . 剩磁方向的确定主要采用主成分分析法^[12]和稳定端点法. 最后采用Fisher统计法^[13]对各剩磁分量进行平均. 有三个采点的样品在高温阶段剩磁方向不稳定, 平均方向采用特征分量与有限点的重磁化大圆弧交汇法得出^[14].

3 古地磁结果

杨庄组典型样品的岩石磁学实验显示, 样品在

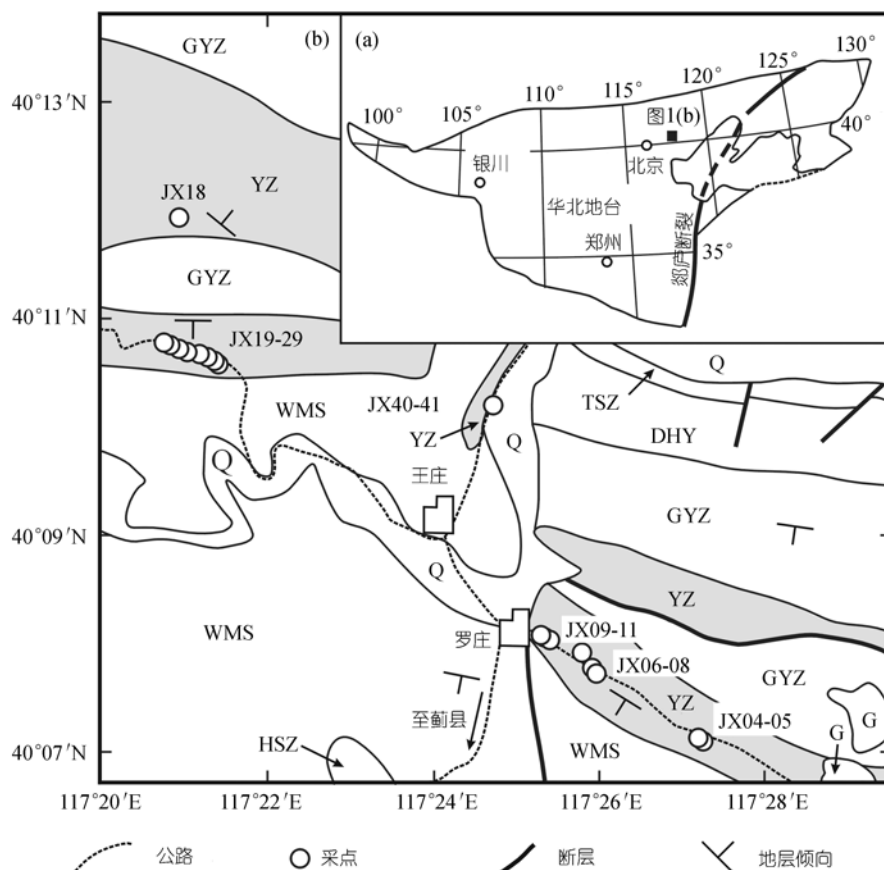


图 1

(a) 华北地台大地构造轮廓和研究区位置; (b) 研究区地质简图和采样点分布. TSZ: 团山子组; DHY: 大红峪组; GYZ: 高于庄组; YZ: 杨庄组; WMS: 雾迷山组; HSZ: 洪水庄组; G: 侵入体; Q: 第四系

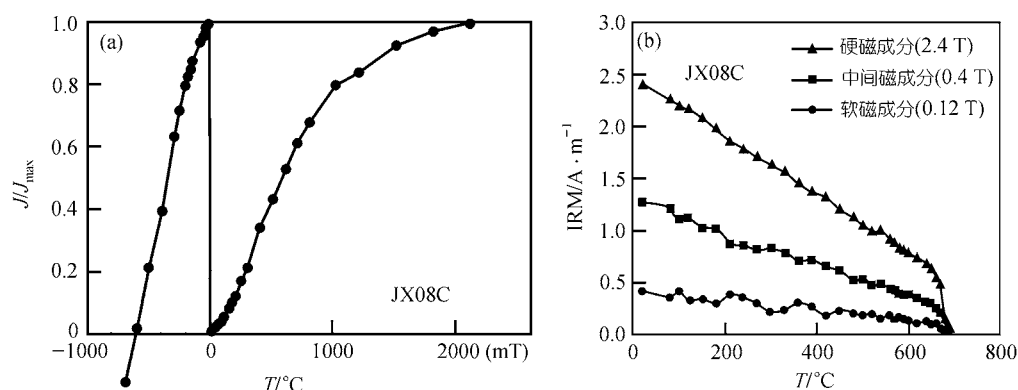


图 2 杨庄组典型样品的等温剩磁、剩磁矫顽力曲线(a)和 Lowrie 实验结果(b)

外场为 2.4 T 时仍未达到饱和, 最大剩磁矫顽力达到 600 mT(图 2(a)). Lowrie 实验^[15]表明样品的三轴等温剩磁解阻温度均在 680 (图 2(b)). 这些特征显示杨庄组样品的载磁矿物主要为赤铁矿.

杨庄组紫红色泥质白云岩样品的天然剩磁强度变化范围为 0.5~5 mA/m. 经过逐步热退磁, 在 100~

200 消除一随机的粘滞剩磁方向后, 大部分样品能够分离出两个剩磁分量. 分量 A 的阻挡温度范围为 100~670 (图 3), 平均方向在现代地理坐标系下与研究区现代地磁场方向接近, 层面校正后精度参数显著降低(图 4(a)). 因而解释为近代场重磁化的结果.

多数样品在高温退磁阶段还可分离出另一分量

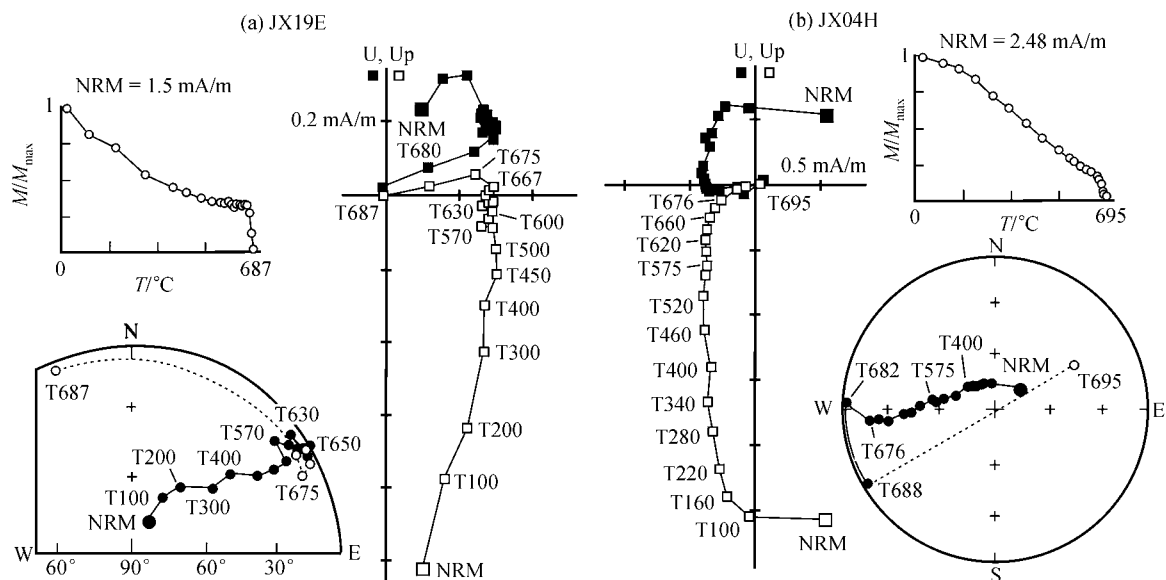


图3 杨庄组典型样品的Z氏图、天然剩磁强度(NRM)衰减图和退磁矢量方向等面积投影图
Z氏图中的实心(空心)框分别代表剩磁方向在水平面(铅垂面)上的投影;等面积投影图中的实心(空心)圆分别代表下半球(上半球)投影(全部结果均为现代地理坐标系下)

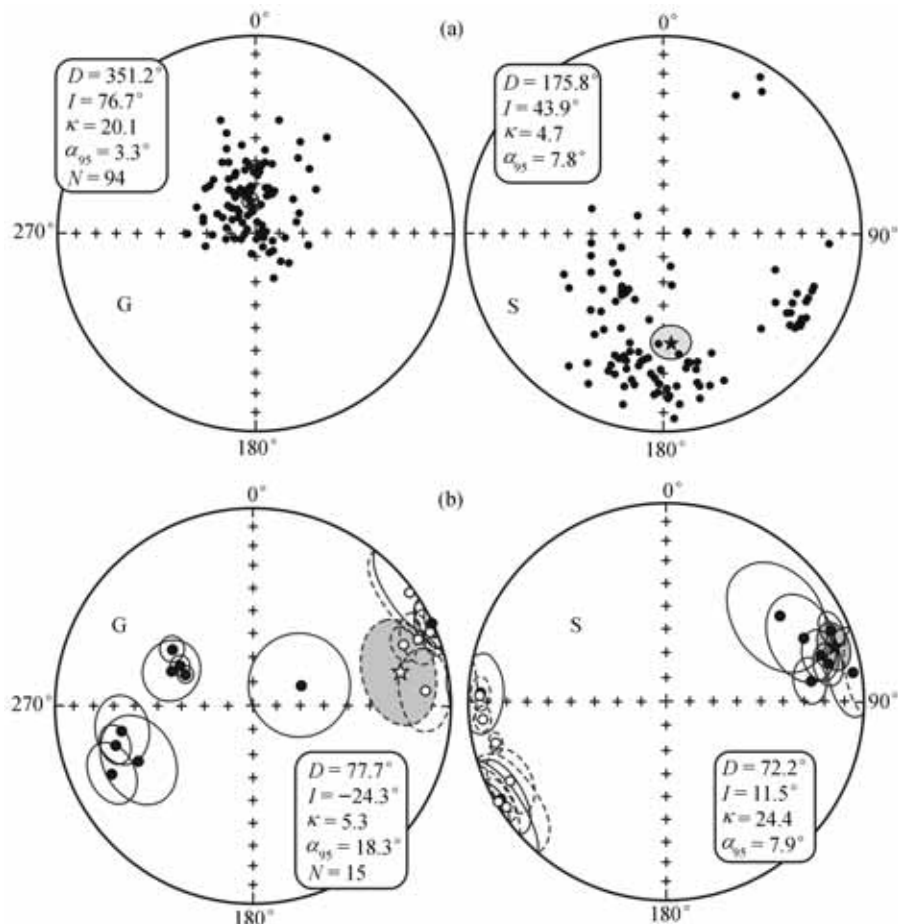


图4 杨庄组低温剩磁分量(a)和高温剩磁分量(b)等面积投影图

实心符号(空心符号)分别代表上半球(下半球)投影,五角星号代表矢量的平均方向。G和S分别代表现代地理坐标系和层面坐标系。

层面坐标系下的高温分量在95%置信水平上通过McFadden和McElhinny的倒转检验^[17]: $\gamma_0 = 14.3^\circ < \gamma_{\text{critical}} = 14.7^\circ$, 等级为C

B(图 3). 两组方向在层面校正后呈对蹠分布, 分别指向东偏北、低正倾角和西偏南、低负倾角(图 4(b)). 从 15 个采点中分离出的高温分量B的平均方向在构造校正前、后分别为 $D = 77.6^{\circ}$, $I = -24.3^{\circ}$ ($\kappa = 5.4$, $\alpha_{95} = 18.3^{\circ}$)和 $D = 72.2^{\circ}$, $I = 11.5^{\circ}$ ($\kappa = 24.6$, $\alpha_{95} = 7.9^{\circ}$)(图 4(b), 表 1), 在 99%置信水平上能够通过褶皱检验^[16](表 1). 据区域地质资料, 褶皱的时代为中-晚侏罗世^[10]. 该分量在 95%置信水平上还能够通过倒转检验^[17]($\gamma_0 = 14.3^{\circ} < 14.7^{\circ}$, 等级为C) (图 4(b)). 其剩磁极性变化与地层层位相关, 在本文研究的杨庄组沉积期间地磁场曾发生多次倒转, 具有磁性地层学的意义(图 5). 分量B层面坐标系下对应的古地磁极位置 (17.3°N , 214.5°E , $dp/dm = 4.1^{\circ}/8.0^{\circ}$), 本文将该磁极命名为YZ. 杨庄组的这一结果和文献^[7, 8]的结论完全不同, 与张惠民等^[9]报道的磁极位置接近. 和前人结果相比, 本次研究提供了退磁细节、确切的褶皱检验、倒转检验和局部构造控制.

磁极YZ的位置与Zhao等^[18]在河西走廊获得的志留-泥盆纪视磁极位置比较接近, 但与Huang等^[19]新报道的、也是在河西走廊获得的志留-泥盆纪古地磁极位置相差非常大. 我们考虑, (1)河西走廊地区构

造复杂, Zhao等^[18]的结果不能排除局部构造旋转的影响(文献^[20], 图 9); (2)华北新元古代和早古生代红层或碳酸盐地层大量的研究并没有报道广泛存在与Zhao等^[18]报道的志留-泥盆纪视磁极位置相似的重磁化成分, 磁极YZ不大可能是在志留-泥盆纪重磁化的结果. 除这一相似性之外, 磁极YZ明显远离在华北地台较其年轻的岩石单元中已报道的所有其他古地磁极^[4,19~23]. 这样, 古地磁极YZ满足Van der Voo提出的所有 7 条判据标准^[24], 可作为华北地台该时期的关键极使用.

4 讨论

华北古陆在Columbia超级大陆中的位置是近年来讨论的关键问题之一, 其核心在于确定华北古陆与Laurentia、Baltica等古大陆的连接关系. 尽管存在争议, 但一般认为由 2.1~1.8 Ga的碰撞造山带连接形成了Columbia超级大陆, 该大陆在 1.6~1.4 Ga期间开始裂解, 1.3~1.2 Ga时期最终解体, 随后形成Rodinia超级大陆^[5,25~29]. 磁极YZ为讨论华北古陆与其他古陆在Columbia时期的连接关系及华北对Columbia超大陆裂解事件的响应提供了重要依据.

表 1 蓟县系杨庄组高温剩磁分量B古地磁结果(剖面位置: 40.1°N , 117.4°E)^{a)}

采点	地层产状	n/n ₀ /(N)	剩磁方向(G)				剩磁方向(S)		视磁极位置			
	倾角/倾向/(°)		D/(°)	I/(°)	κ	α ₉₅ /(°)	D/(°)	I/(°)	Lat./(°N)	Long./(°E)	dp/(°)	dm/(°)
JX04	46/208.5	8/9	243.5	35.4	11.7	16.9	236.5	-4.6	-26.6	48.7	8.5	16.9
JX06	55/247	4/7	292.2	53.6	56.8	12.3	272.1	6.8	3.8	28.7	6.2	12.4
JX07	36/224	11/13	243.6	21.4	17.9	11.1	242.7	-12.8	-24.9	40.6	5.8	11.3
JX08	36/210	6/6	68.5	-18.5	121.6	6.1	66.8	9.8	20.8	218.9	3.1	6.2
JX09	89/238	8/8	293.8	59.8	282.6	3.3	256.1	-12.8	-14.8	31.4	1.7	3.4
JX10	83/236	12/12	304.4	49.4	70.6	5.2	272.1	-7.1	-0.7	23.3	2.6	5.2
JX11	83/236	13/14	297.9	56.0	103.2	4.1	264.5	-8.2	-6.9	27.8	2.1	4.1
JX18	41/043	3/3	68.6	68.7	34.9	21.2	53.2	29.0	37.9	219.6	12.9	23.4
JX19	67/178	8/8	68.0	-2.7	58.9	7.3	77.2	16.9	15.3	209.0	3.9	7.5
JX20*	62/182	6/15	54.4	-2.1	25.7	15.9	65.4	24.7	27.0	213.2	9.1	17.1
JX22	65/186	4/8	65.7	0.1	131.2	8.1	82.1	27.2	15.2	201.2	4.8	8.8
JX23*	65/186	12/12	68.4	-10.6	27.3	8.8	73.6	19.6	18.9	210.1	4.8	9.1
JX27*	65/187	5/7	85.4	-12.8	49.9	13.6	81.2	4.6	8.2	211.3	6.8	13.6
JX28	59/186	6/6	258.4	32.9	29.9	12.5	239.3	3.6	-21.7	49.7	6.3	12.5
JX29	62/183	6/6	253.5	28.4	90.0	7.1	239.1	-2.1	-23.9	47.7	3.6	7.1
“正常”极性		(7)	68.3	1.2			71.6	19.1	20.4	211.7	5.4	10.3
“倒转”极性		(8)	268.5	44.7			252.7	-4.8	-14.7	36.9	5.9	11.7
采点平均†		(15)	77.6	-24.3	5.4	18.3						
		(15)			24.6	7.9	72.2	11.5	17.3	214.5	4.1	8.0

†在 99%置信水平上通过McFadden (定义 2)的褶皱检验^[16]: $N = 15$, $SCOS\ 95\% = 4.510$, $SCOS\ 99\% = 6.305$; 产状校正前: $SCOS2 = 8.767$, 产状校正后: $SCOS2 = 1.629$. 在 95%置信水平上通过McFadden和McElhinny的倒转检验^[17]: $\gamma_0 = 14.3^{\circ} < \gamma_{critical} = 14.7^{\circ}$, 等级为C

a) 带星号采点的平均方向根据特征分量与有限制点的重磁化大圆弧交汇法得出^[14]. 由于前寒武纪地磁场极性的不确定性, 本文将层面坐标系下东北东向、低正倾角的剩磁方向定为“正常”极性. n/n₀(N): 有效样品数/参加退磁样品数/采点数; G/S分别表示地理坐标系/层面坐标系. D: 磁偏角; I: 磁倾角; κ : Fisher统计精度参数; α_{95} : 95%置信圆锥半顶角; 视磁极位置根据产状校正后的平均方向计算得出; Lat.(°N)/Long.(°E): 视磁极位置(北纬, 东经); dp/dm: 古地磁极的置信椭圆半长轴/半短轴

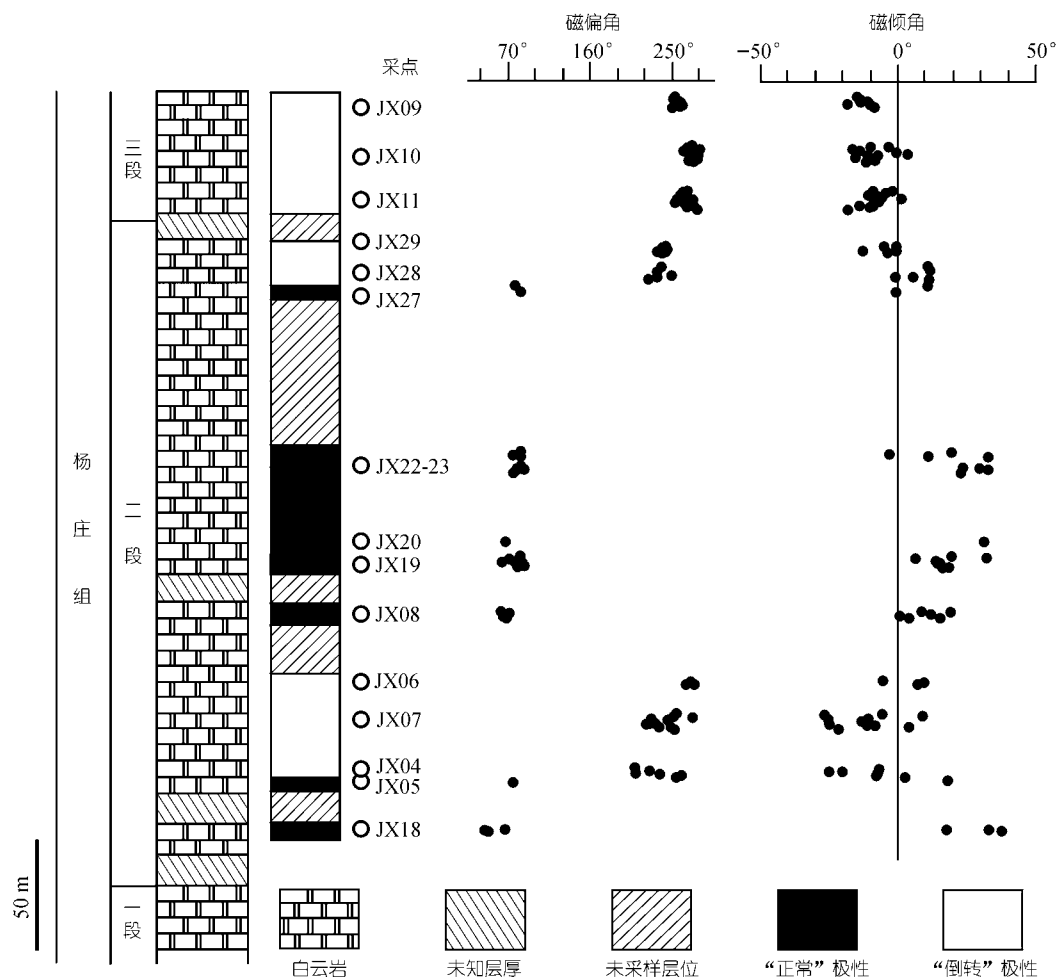


图5 杨庄组磁性地层柱状图

除本次从杨庄组(~ 1350 Ma)获得的磁极YZ外, 华北地台中元古代另一个高质量古地磁极TH(表2)是Halls等^[30]从山西太行地区年龄为 1769.1 ± 2.5 Ma的基性岩墙群中获得, 该极通过了烘烤检验. 在Laurentia大陆, 与华北地台磁极TH年龄相近的一个磁极(MD)是从Trans-Hudson造山带附近年龄为 1.88 Ga的Molson岩墙群中获得的, 被解释为 $1.82 \sim 1.72$ Ga时期的^[30]重磁化极(表2). 从年龄约为 $1320 \sim 1290$ Ma的Nain anorthosite杂岩中获得的古地磁极(NA)虽然没有野外检验, 但该磁极在Laurentia大陆 $1460 \sim 1265$ Ma期间关键极的连线上^[31, 32], 也可以作为可靠极使用^[32]. 在Baltica大陆, 新获得的关键极(SF)来自Karelia地区Vazhinka河剖面约 1780 Ma的红色砂岩中^[33], 能够通过倒转检验(表2). Siberia大陆在中元古代没有关键极, 具有较好年龄控制的磁极(CD)从Anabar地盾年龄为 1384 ± 2 Ma的Chieress岩墙中获

得, 能够通过广义的接触检验^[34]. 其他大陆缺少 $1.8 \sim 1.3$ Ga时期高质量的古地磁数据.

考虑到很大的时间间隔, 这些磁极的极性是不能确定的, 极移曲线的连接只表示其中的一种可能性. 对 $1800 \sim 1265$ Ma期间各大陆视极移曲线(或古地磁极)进行比较, 支持图6所示的古大陆再造方式. 分别将华北、Baltica和Siberia大陆旋转至北美坐标系下, 旋转后Baltica西北部与Laurentia大陆Greenland的东北部相连, Siberia东南部与Laurentia西北部相连, 华北北部与Siberia北部相连(现代方位, 下同)(图6). 旋转后, $1800 \sim 1750$ Ma期间, Baltica大陆的磁极SF、华北的磁极TH和Laurentia大陆的磁极MD均落入同一区域, 其中磁极TH和SF的95%置信圆能够相互重叠. 在 $1400 \sim 1300$ Ma期间, 华北的磁极YZ, Laurentia大陆的磁极NA和Siberia大陆的磁极CD的95%置信圆也能够相互重叠. Baltica大陆的磁极

表 2 主要大陆 1800~1265 Ma期间高质量古地磁数据表^{a)}

代号	采样地区和岩石单元	Lat./(^{\circ}N)	Long./(^{\circ}E)	A ₉₅ /(^{\circ})	年龄/Ma	文献
华北地台						
TH	太行基性岩墙群	36.0	247.0	2.8	1769.1 ± 2.5	[30]
YZ	杨庄组紫红色泥质白云岩	17.3	214.5	5.7	1350 Ma	本文
Laurentia						
MD	Molson dykes	15.4	263.5	4.0	1820~1720	[30]
MA	Michikamau anorthosite pluton	-2.0	218.0	5.0	1460	[32]
HL	Harp Lake complex	2.0	206.0	4.0	1450	[32]
LA	Laramie complex and Sherman granite	-7.0	215.0	4.0	1434	[32]
MQ	Mistastin complex	-1.0	201.0	8.0	1420	[32]
NA	Nain anorthosite	12.0	210.0	3.0	1320~1290	[32]
MAD	Mackenzie dolerite dykes	4.0	190.0	5.0	1267 ± 2	[32]
Baltica						
SF	Shoksha Formation, Vepsian Group	39.7	221.1	4.0	1780	[33]
SQ	Subjotnian quartz porphyry dykes	29.0	177.0	6.0	1630	[32]
AD	Åland dolerite dykes	28.0	188.0	9.0	1577 ± 12	[32]
AQ	Åland quartz porphyry dykes	12.0	182.0	7.0	1571 ± 20; 1571 ± 9	[32]
MJD	Mean Jotnian dolerite intrusions	4.0	158.0	4.0	1265	[32]
Siberia						
CD	Chieress dyke	4	258	6.6	1384 ± 2	[34]

a) Lat.(^{\circ}N)/Long.(^{\circ}E): 视磁极位置(北纬, 东经); A₉₅表示 95%置信圆锥半顶角

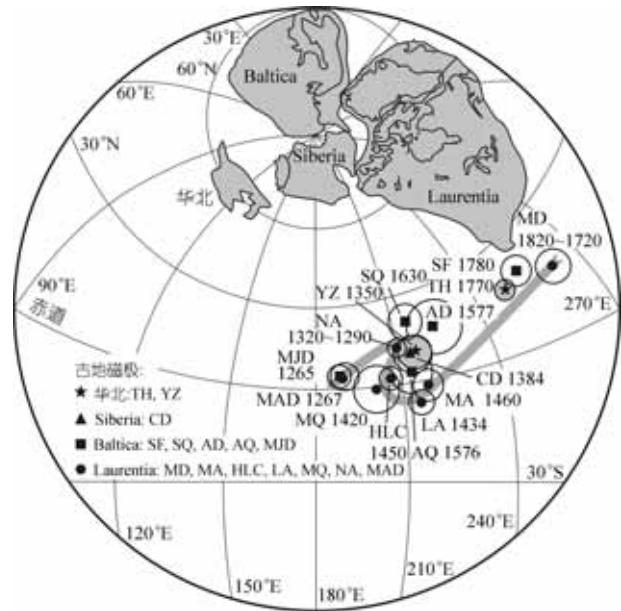


图 6 1800 ~ 1350 Ma 期间华北地台与 Laurentia、Baltica 和 Siberia 连接关系的古大陆再造图

再造方式按现代北美地理坐标系. 各大陆相对 Laurentia 大陆的欧拉旋转参数(正/负值为逆时针/顺时针旋转): 华北地台(10.81^{\circ}N, 196.44^{\circ}E, -24.04^{\circ}), Baltica (51.80^{\circ}N, 353.75^{\circ}E, 35.89^{\circ}), Siberia(77.14^{\circ}N, 113.19^{\circ}E, 138.73^{\circ}). 磁极位置、年龄数据和文献见表 2. 磁极代号后的数字表示磁极年龄(Ma)

MJD 和 Laurentia 大陆的磁极 MAD 的时代极为接近 (~1265 Ma), 旋转后能够重合. 视极移曲线(或古地磁极)的拟合结果说明, 华北与 Laurentia、Baltica 和

Siberia 大陆在 1800~1350 Ma 期间可能保持稳定的连接一起运动.

该再造方式从古地磁角度提出了一种确定的古大陆连接关系, 同时也可以得到地质证据的支持. Karlstrom等[35]认为Laurentia南部在 1.8~1.0 Ga期间发育的增生造山带可一直延伸至波罗的大陆, 提出 Baltica在此期间和Laurentia的Greenland相连. 许多学者根据Siberia和Laurentia之间太古代和古元古代地质特征的相似性, 认为Siberia自古元古代以来一直与Laurentia北部相连[36,37], 直到早寒武世两者才开始分离[38]. 华北地台在 1800~1350 Ma期间与Laurentia、Baltica和Siberia大陆稳定的连接关系, 与地质、古生物方面的证据[1~3,6]也不矛盾. 其与Laurentia之间的相对关系与Li等[3]所提出的古大陆再造比较相似. 华北古陆似乎没有象Rogers和Santosh[27]认为的那样在 1.7~1.6 Ga时期即从Columbia中分离出去, 而是与Laurentia、Baltica等主要古陆相连, 持续到Columbia超级大陆开始全面解体的时期. 目前在华北地台北缘鉴定出的裂谷和被动大陆边缘建造被解释为Columbia超级大陆裂解的线索[5], 但其时代没有得到很好的控制[5,39,40]. 根据本文的再造, 由华北地台北缘中元古代裂谷作用所能导致的大规模的板块相对运动, 如果存在, 不应早于~1350 Ma.

致谢 感谢陆松年、李怀坤、李勇、任建光、李晶、李东、

方琳浩和张国良给予野外和实验室工作的帮助。感谢审稿人赵国春和黄宝春提出的宝贵意见。古地磁数据分析使用了 R. Enkin 的 PMGSC 程序, 古大陆再造使用了 T. H. Torsvik 的 GMAT32 程序。本研究受国家自然科学基金重点项目(批准号: 40032010-B)资助。

参 考 文 献

- 1 王荃, 刘雪亚, 李锦铁. 中国华夏与安加拉古陆间的板块构造. 北京: 北京大学出版社, 1991. 1~151
- 2 唐克东. 中朝板块北侧褶皱带构造演化及成矿规律. 北京: 北京大学出版社, 1992. 1~277
- 3 Li Z X, Zhang L, Powell C M. Positions of the East Asian cratons in the Neoproterozoic supercontinent Rodinia. *Aust J Earth Sci*, 1996, 43: 593~604
- 4 张世红, 李正祥, 吴怀春, 等. 华北地台新元古代古地磁研究新成果及其古地理意义. *中国科学, D 辑*, 2000, 30(增刊): 138~147
- 5 Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup. *Earth-Sci Rev*, 2004, 67: 91~123[DOI]
- 6 Wang H Z, Zhang S H, He G Q. China and Mongolia. In: Selley R C, Cocks L R M, Plimer I R, eds. *Encyclopedia of geology*. Oxford: Elsevier, 2005. 345~358
- 7 Zhang H M, Zhang W Z. Paleomagnetic data, late Precambrian magnetostratigraphy and tectonic evolution of eastern China. *Precamb Res*, 1985, 29: 65~75[DOI]
- 8 林金录. 蓟县中、上元古界剖面的古地磁结果. *科学通报*, 1988, 33: 207~210
- 9 张惠民, 张文治, Elston D P. 华北蓟县中、上元古界古地磁研究. *地球物理学报*, 1991, 34 (5): 602~615
- 10 河北省地质矿产局. 河北省、北京市、天津市区域地质志. 北京: 地质出版社, 1989. 1~741
- 11 王松山, 桑海清, 裘冀, 等. 蓟县剖面杨庄组和雾迷山组形成年龄的研究. *地球科学*, 1995, 30(2): 166~173
- 12 Kirschvink J K. The least-squares line and plane and analysis of paleomagnetic data. *Geophys J Roy Astr Soc*, 1980, 62: 699~718
- 13 Fisher R A. Dispersion on a sphere. *Proc R Soc Lond*, 1953, A217: 295~305
- 14 McFadden P L, McElhinny M W. The combined analysis of remagnetization circle and direct observation in paleomagnetism. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 87: 161~172[DOI]
- 15 Lowrie W. Identification of ferromagnetic minerals in a rock by coercivity and unblocking temperature properties. *Geophys Res Lett*, 1990, 17(2): 159~162
- 16 McFadden P L. A new fold test for paleomagnetic studies. *Geophys. J Int*, 1990, 103: 163~169
- 17 McFadden P L, McElhinny M W. Classification of the reversal test in paleomagnetism. *Geophys J Int*, 1990, 103: 725~729
- 18 Zhao X X, Coe R S, Wu H N, et al. Silurian and Devonian paleomagnetic poles from North China and implications for Gondwana. *Earth Planet Sci Lett*, 1993, 117: 497~506[DOI]
- 19 Huang B C, Otofujii Y, Yang Z Y, et al. New Silurian and Devonian palaeomagnetic results from the Hexi Corridor terrane, Northwest China and their tectonic implications. *Geophys J Int*, 2000, 140: 132~146[DOI]
- 20 Huang B C, Otofujii Y, Zhu R X, et al. Paleomagnetism of Carboniferous sediments in the Hexi corridor: its origin and tectonic implications. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 194: 135~149[DOI]
- 21 Zhao X X, Coe R S, Gilder S A, et al. Palaeomagnetic constraints on the palaeogeography of China: implications for Gondwanaland. *Aust J Earth Sci*, 1996, 43: 643~672
- 22 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. *中国科学, D 辑*, 1998, 28(增刊): 1~16
- 23 Huang B C, Yang Z Y, Otofujii Y, et al. Early Paleozoic paleomagnetic poles from the western part of North China block and their implications. *Tectonophysics*, 1999, 308: 377~402[DOI]
- 24 Van der Voo R. Phanerozoic paleomagnetic poles from Europe and North America and comparisons with continental reconstructions. *Rev Geophys*, 1990, 28: 167~206
- 25 Condie K C. Breakup of a Paleoproterozoic Supercontinent. *Gond Res*, 2002, 5(1): 41~43
- 26 Rogers J, Santosh M. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic Supercontinent. *Gond Res*, 2002, 5: 5~22
- 27 Wilde S A, Zhao G C, Sun M. Development of the North China Craton during the Late Archaean and its final amalgamation at 1.8 Ga: some speculations on its position within a global Palaeoproterozoic Supercontinent. *Gond Res*, 2002, 5: 85~94
- 28 Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Review of global 2.1~1.8 Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth-Sci Rev*, 2002, 59: 125~162[DOI]
- 29 Meert J G. Paleomagnetic evidence for a Paleo-Mesoproterozoic supercontinent Columbia. *Gond Res*, 2002, 5: 207~215
- 30 Halls H C, Li J, Davis D, et al. A precisely dated Proterozoic paleomagnetic pole from the North China craton, and its relevance to paleocontinental reconstruction. *Geophys J Int*, 2000, 143: 185~203[DOI]
- 31 Buchan K L, Mertanen S, Park R G, et al. Comparing the drift of Laurentia and Baltica in the Proterozoic: the importance of key paleomagnetic poles. *Tectonophysics*, 2000, 319: 167~198[DOI]
- 32 Buchan K L, Ernst R E, Hamilton M A, et al. Rodinia: the evidence from integrated palaeomagnetism and U-Pb geochronology. *Precamb Res*, 2001, 110: 9~32[DOI]
- 33 Pisarevsky S A, Sokolov S J. The magnetostratigraphy and a 1780 Ma palaeomagnetic pole from the red sandstones of the Vazhinka River section, Karelia, Russia. *Geophys J Int*, 2001, 146: 531~538
- 34 Ernst R E, Buchan K L, Hamilton M A, et al. Integrated paleomagnetism and U-Pb geochronology of mafic dikes of the eastern Anabar Shield region, Siberia: Implications for Mesoproterozoic paleolatitude of Siberia and comparison with Laurentia. *J Geol*, 2000, 108: 381~401[DOI]
- 35 Karlstrom K E, Åhäll K -I, Harlan S S, et al. Long-lived (1.8~1.0Ga) convergent orogen in southern Laurentia, its extensions to Australia and Baltica, and implications for refining Rodinia. *Precamb Res*, 2001, 111: 5~30[DOI]
- 36 Frost B R, Avchenko O V, Chamberlain K R, et al. Evidence for extensive Proterozoic remobilization of the Aldan Shield and implications for Proterozoic plate tectonic reconstructions of Siberia and Laurentia. *Precamb Res*, 1998, 89: 1~23[DOI]
- 37 Rainbird R H, Stern R A, Khudoley A K, et al. U-Pb geochronology of Riphean sandstone and gabbro from southeast Siberia and its bearing on the Laurentia-Siberia connection. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 164: 409~420[DOI]
- 38 Pelechay S M. Stratigraphic evidence for the Siberia-Laurentia connection and Early Cambrian rifting. *Geology*, 1996, 24: 719~722[DOI]
- 39 陆松年, 杨春亮, 李怀坤, 等. 华北古大陆与哥伦比亚超大陆. *地质前缘*, 2002, 9(4): 225~233
- 40 周建波, 郑永飞, 杨晓勇, 等. 白云鄂博地区构造格局与古板块构造演化. *高校地质学报*, 2002, 8(1): 46~61

(2005-05-23 收稿, 2005-06-20 收修改稿)