

地磁学与地电学

——第5章 古地磁学

陈 涛

地球物理学院
中国石油大学（北京）

2024/4/25

课前测试

- 定性解释
- 定量解释

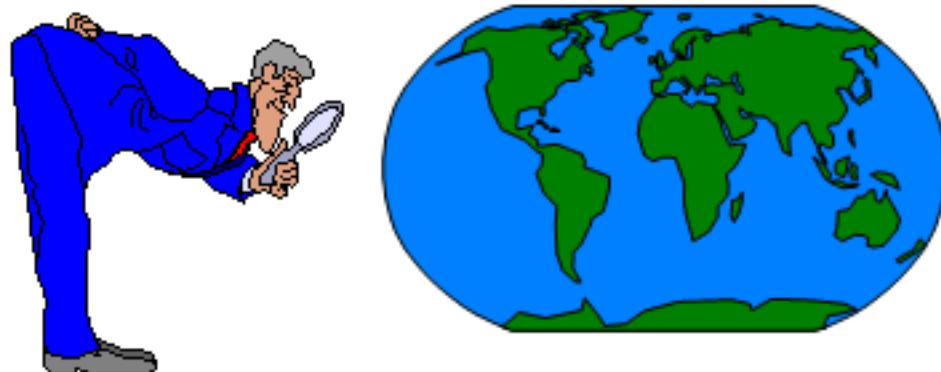


课前知识

- ✓ 剩磁
- ✓ 顺磁性、抗磁性以及铁磁性
- ✓ 感应磁化强度和剩余磁化强度

课前知识

- 古地磁学是地磁学的一个分支，兴起于20世纪50年代，从60、70年代迅速发展。
- 它是通过**岩石剩余磁化强度**来研究史前地质时期**地磁场及其演化规律**的一门学科。



岩石记录磁场信息过程

歌唱家



录音机



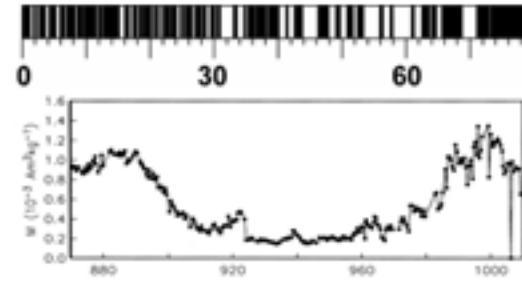
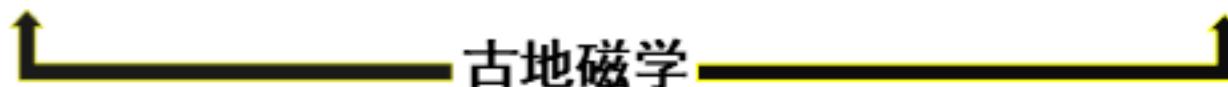
磁带



地磁场

岩石或沉积物

磁学记录





<https://cm2.sustech.edu.cn/>

<https://cm2.sustech.edu.cn/software.html>

目 录

地磁部分章节

第五章 古地磁学

1. 古地磁学基础

天然剩余磁化强度（NRM）— 岩石在大自然条件下获得的剩余磁化强度

自然界中大多数岩石都含有少量的铁磁性矿物，这些**铁磁性矿物**被地磁场磁化并保留了一部分剩余磁性，岩石的NRM正是由这些铁磁性矿物颗粒所携带的。

各类岩石剩余磁化强度的范围

岩石类型	超基性岩	基性岩	酸性岩	变质岩	沉积岩
剩磁强度 ($\times 10^{-3}$ A/m)	10^2 — 10^4	10^0 — 10^4	10^0 — 10^4	10^{-2} — 10^2	10^{-2} — 10^2

天然剩磁的形成机制？

- 热剩磁（TRM-Thermal Remanent Magnetization）
- 化学剩磁（CRM-Chemical Remanent Magnetization）
- 沉积剩磁（DRM-Detrital Remanent Magnetization）
- 等温剩磁（IRM-Isothermal Remanent Magnetization）
- 粘滞剩磁（VRM-Viscous Remanent Magnetization）

1. 古地磁学基础

■ 古地磁学的两个基本前提

一、稳定的原生剩余磁化强度

岩石的原生剩磁方向与岩石形成时的地磁场方向一致，且强度呈正比，所以研究岩石的原生剩磁就能推测岩石形成时的地磁场特征。

二、轴向地心偶极子场假说

按偶极子公式，磁倾角 I 与磁纬度 φ 的关系为

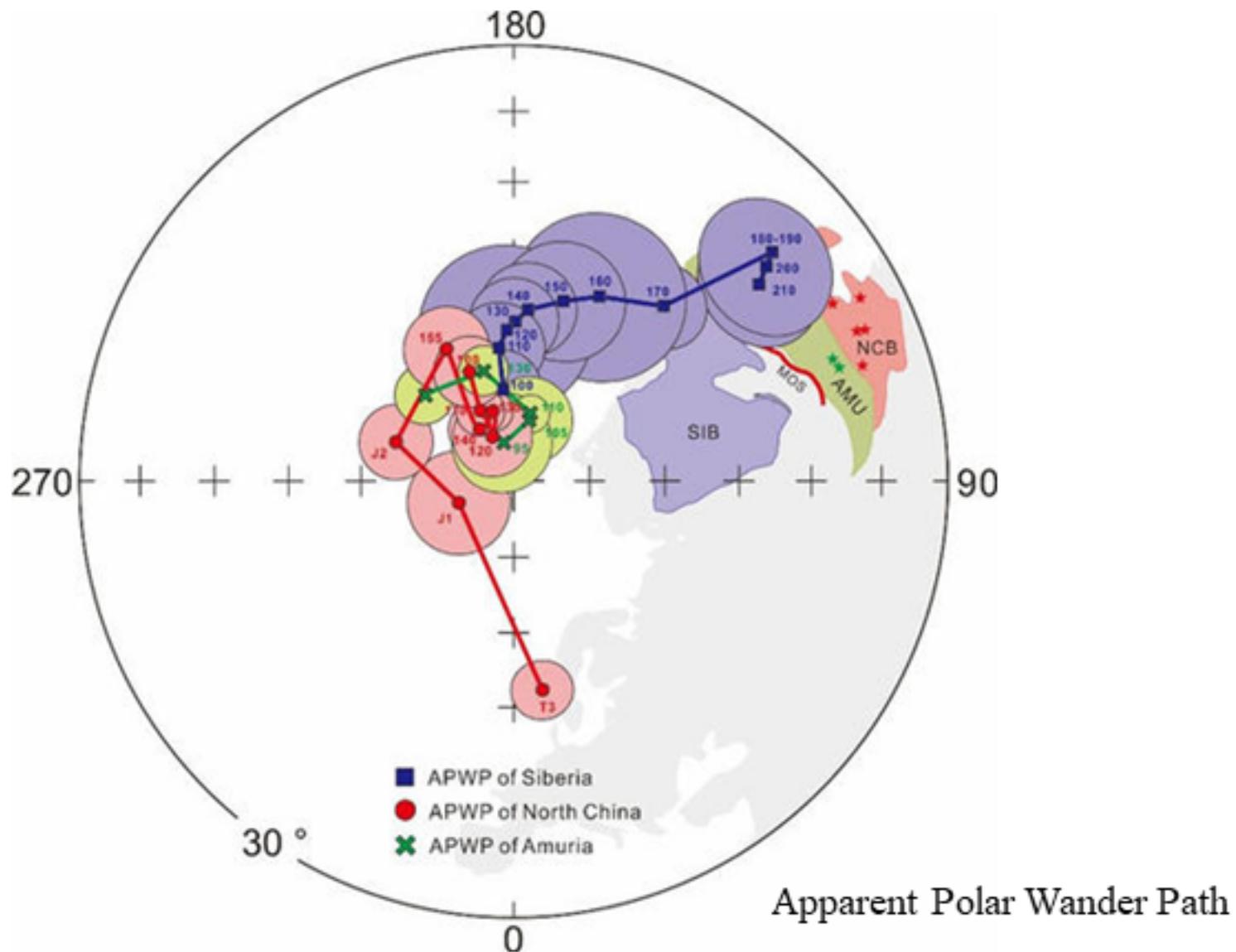
$$\tan I = 2 \tan \varphi$$

如果测得古地磁岩石标本原生剩磁的倾角，由上式可计算出岩石形成时的古纬度。再根据剩磁的偏角 D ，可以计算出采样地点的古地磁极的位置。

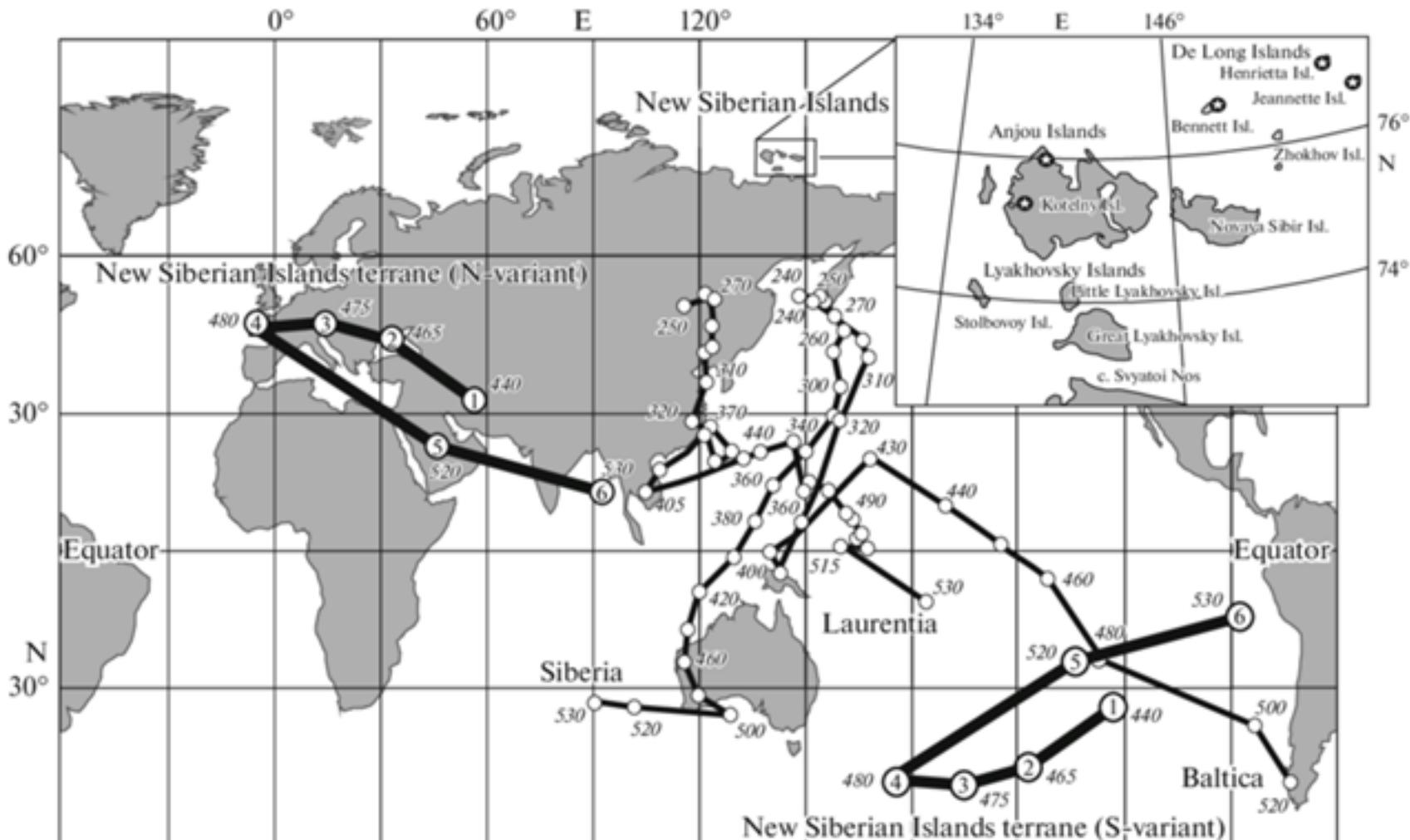
1. 古地磁学基础

■ 古地磁极

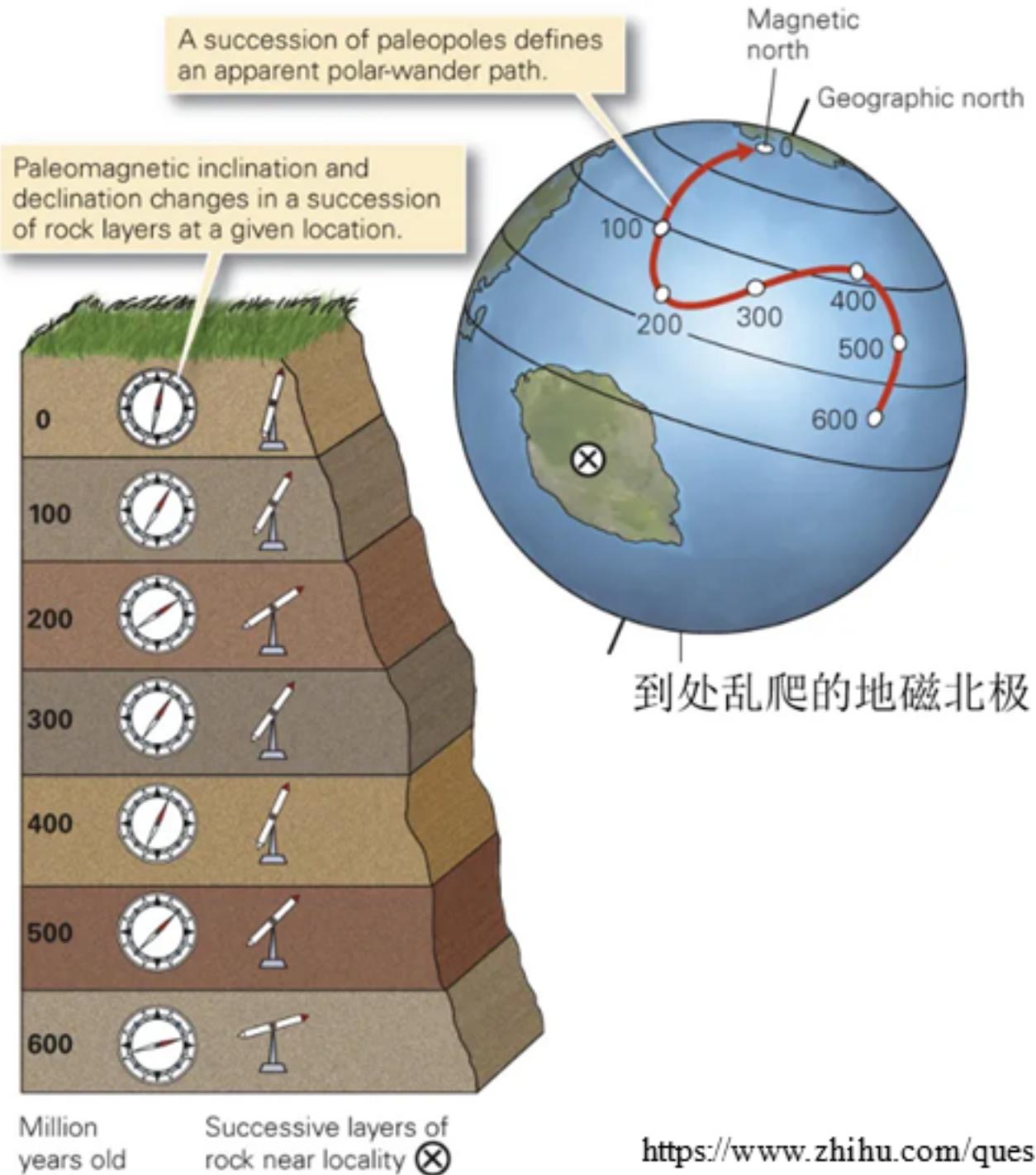
- 对时间平均的倾角对应于地心轴向偶极子场假说中的古纬度，对时间平均的偏角表示子午线的方向，由此可得地球表面相应地理极的位置。虚地磁极 $P(\lambda_p, \varphi_p)$
- 虚地磁极 VGP 是任一瞬时古地磁场方向计算出的磁极位置。若在计算使用“足够长”时间地磁场方向的平均值，则计算出古地磁极。
- 若将某一稳定地块上各地质历史时期的古地磁极位置绘在地理坐标图上，并连成一条曲线或一个带，即为古地磁极移曲线。
- 假定地块固定，而认为极在移动，则它不是地磁极的真实运动，故称为视极移曲线。
- 在作古地磁研究时，通常在每一观测点采集不同年龄的系列标本，且按以万年计算的间隔大致均匀分布，有时也可按几百万年间隔计算。



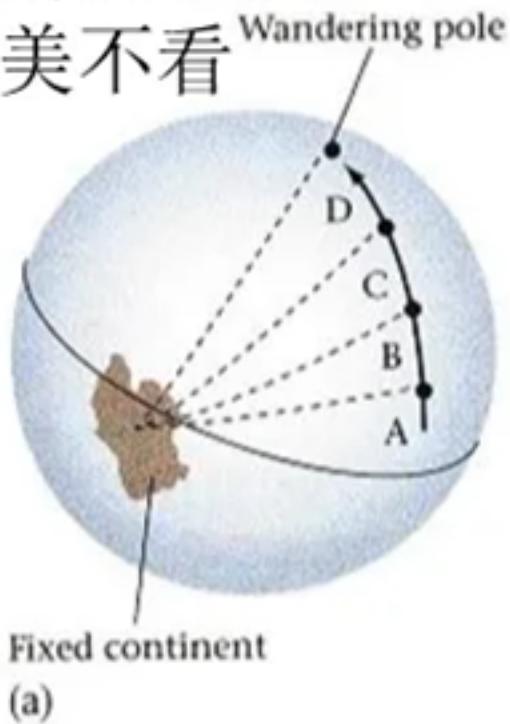
晚中生代蒙古、华北和西伯利亚视极移曲线对比图



新西伯利亚群岛与西伯利亚、劳伦和波罗的海APWPs对比

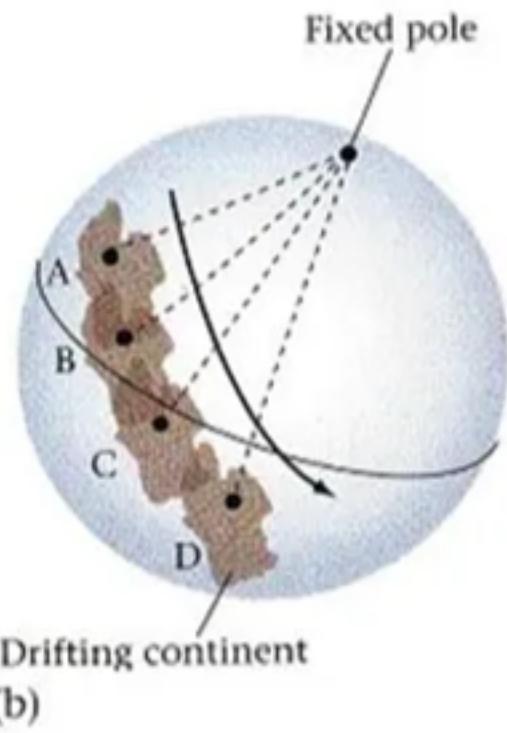


游荡的磁极
画美不看



(a)

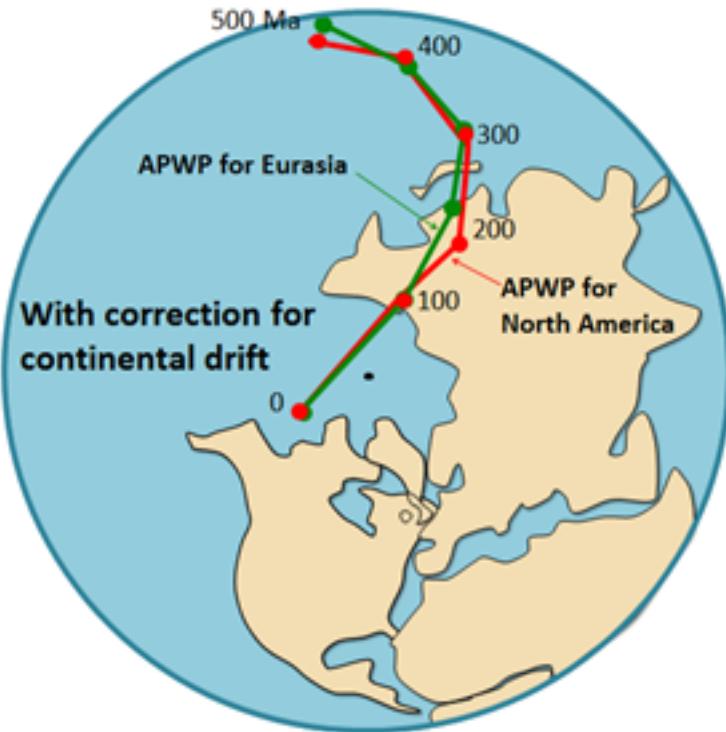
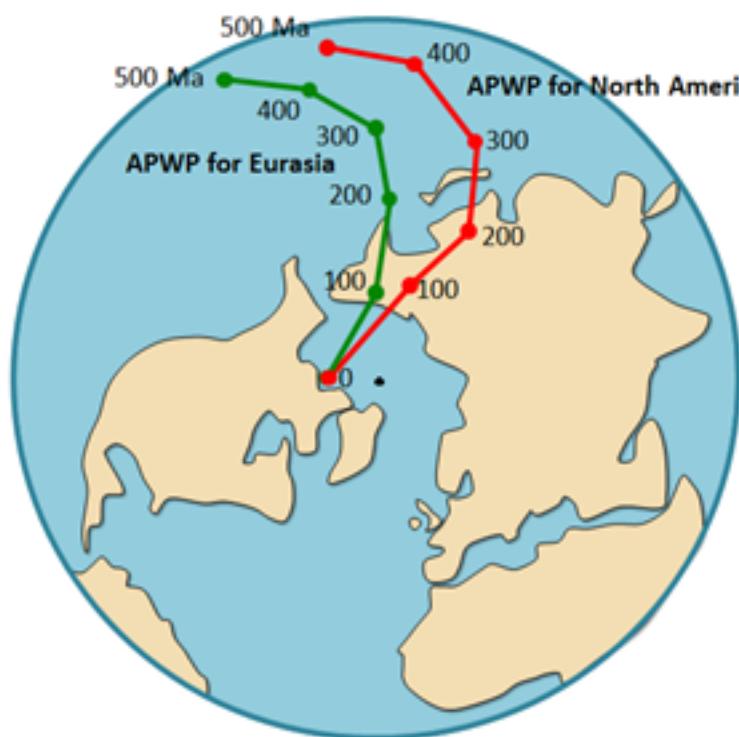
更现实的情况



(b)

将古论今，将古论未来

——地质思维中一个重要的方法论



1. 古地磁学基础

■ 古地磁场强度

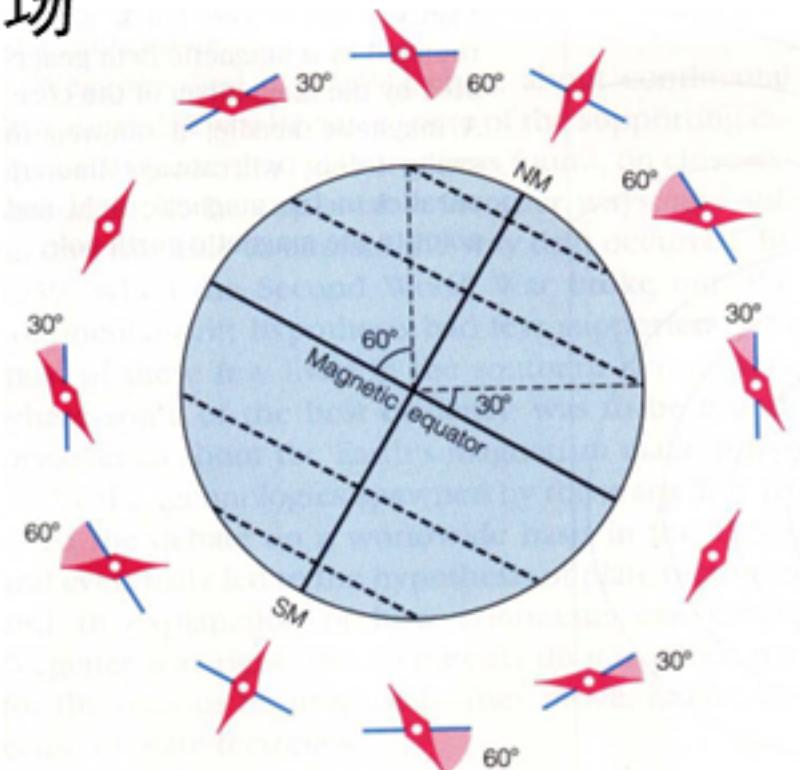
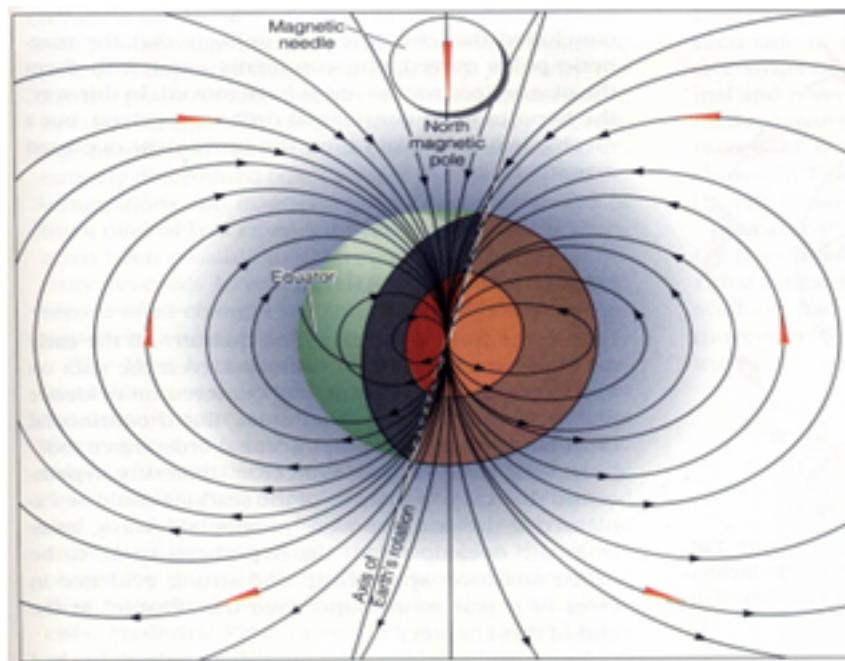
- 在弱磁场中（与地磁场相当）所产生的任何类型剩磁强度与该磁化场成正比。
- 在实验室里，在弱磁场 H_L 中，重演原始磁化强度——热剩磁、取向剩磁的形成过程，并将得到的磁化强度 M_{rL} 和原始剩磁强度 M_{ro} 进行比较，若自岩石形成以来其磁性没有改变，利用正比规律，写成：

$$\frac{H_0}{M_{ro}} = \frac{H_L}{M_{rL}}$$

- 利用上式即可确定古地磁场强度 H_0
- 实际测量推算古地磁场强度的过程远比这复杂得多，通常需要采用逐步加热法，即逐步加热退去样品在各个温度区间的部分天然剩余磁性（NRM），并产生各温度区间的部分热剩余磁性（TRM），根据NRM/TRM的比值确定古地磁场强度值，俗称特利埃法。

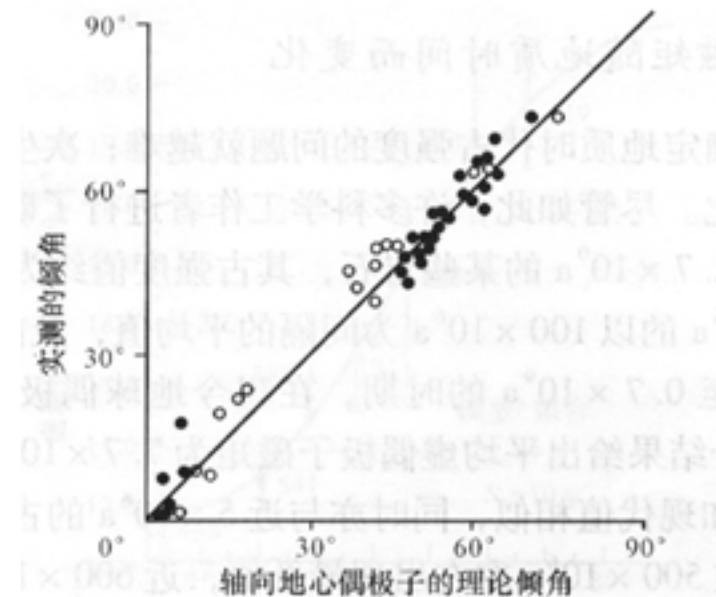
1. 古地磁学基础

■ 古地磁场是轴向偶极子场



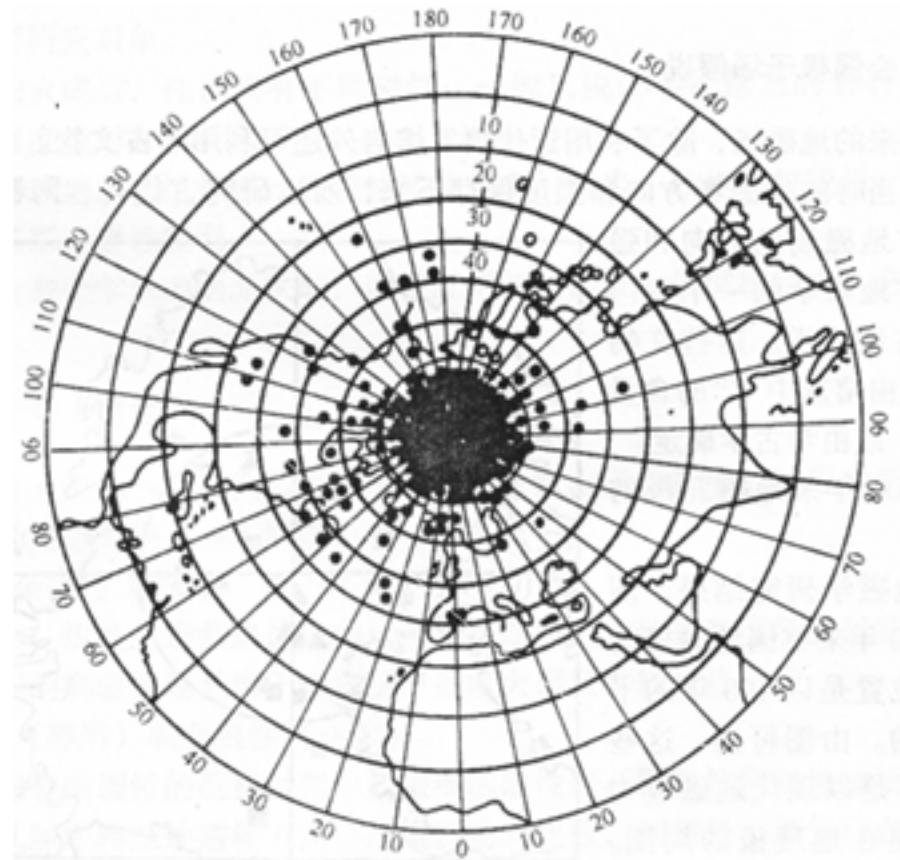
现代地磁场的基本场是地心偶极子场，地磁轴与地理轴相交 11.5° ，即现代地磁场不是轴向场。

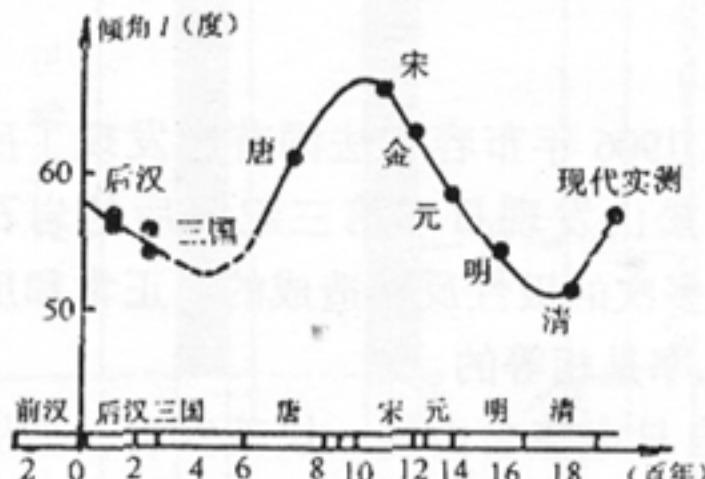
- ✓ 深海沉积物也有剩余磁性，剩磁的方向记录着形成这些沉积物时地磁场的方向，深海沉积的速度极为缓慢，约1-10毫米 / 千年。所以长10 m的海底沉积物记录着几百万年的地磁场历史
- ✓ 由于从岩芯上取下来的测试样品长度约为几毫米，就代表了几千年的沉积过程，它的剩磁方向是几千年的**平均方向**，就是说，地磁场的长期变化被平均掉了。



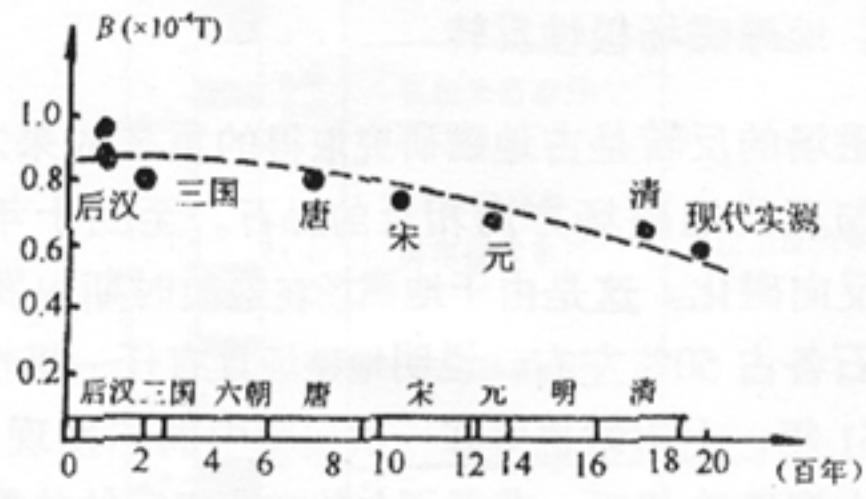
上图是测定2 Ma深海沉积岩心的磁倾角结果，其与按轴向地心偶极子计算的理论倾角吻合很好，说明2 Ma年以来地磁场仍具轴向偶极子场的特征。

对世界两千万年（第三纪中新世以来）来火山岩的观测结果，计算出的一千多个古地磁极的位置图。这些地磁极是以地理极为中心分布的，就平均而言两千万年来古地磁场是轴向地心偶极子场。





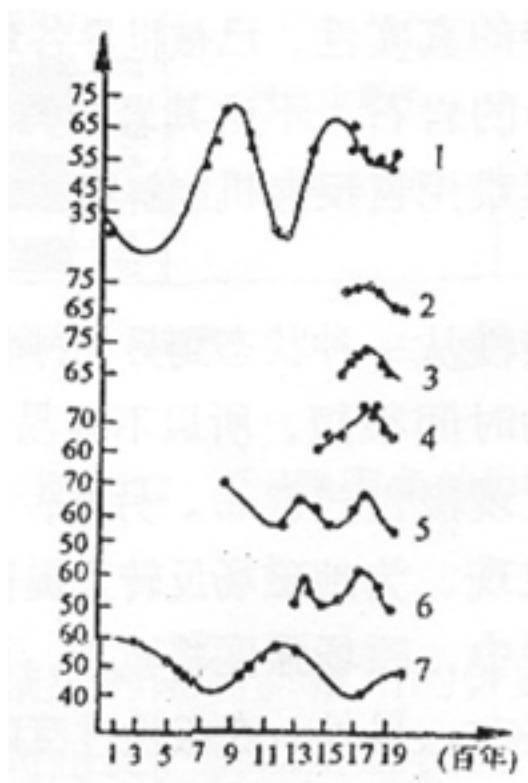
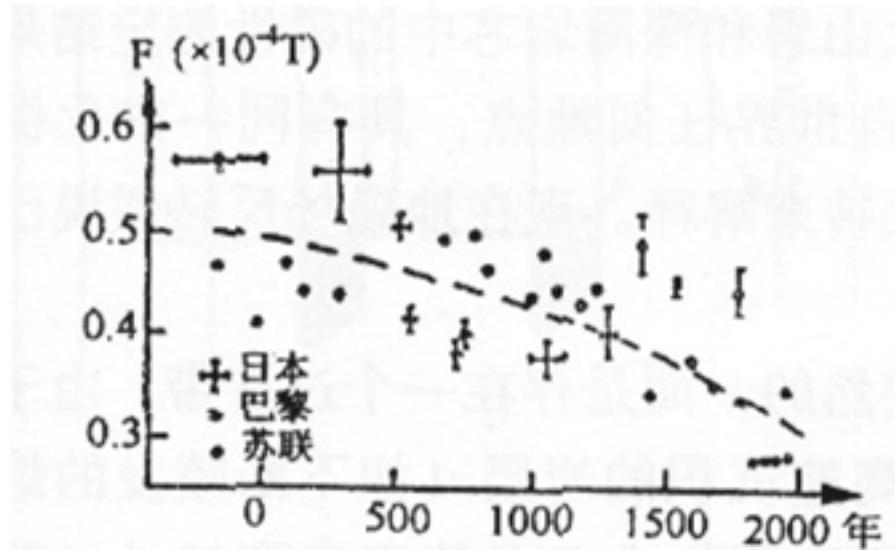
(a)



(b)

我国有人对北京地区、汉、三国、唐、宋、金、元、明、清各朝代的**墓砖**、**城砖**进行了剩余磁性研究，获得了北京地区两千来的地磁场强度和倾角变化。可以看到，地磁场强度在逐渐减少。地磁倾角有周期变化，周期约一千余年，变化幅度约 20° 。

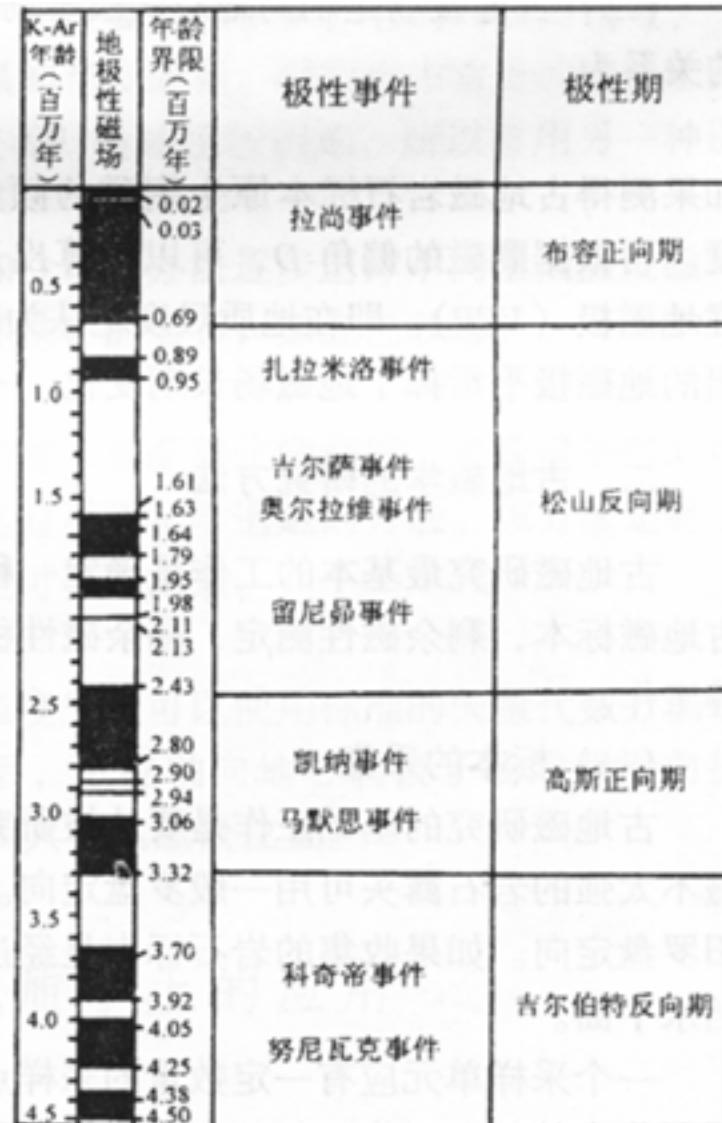
世界各地近两千来的地磁场强度和磁倾角变化，也显示了同样的趋势，但各地区倾角变化的相位不同。



1. 古地磁学基础

■ 地球磁场极性反转

- ✓ 地磁场的反转是古地磁研究取得的重要成果之一。
- ✓ 1906年布容在法国首次发现了反向磁化(与现代地磁场方向相反的岩石)。
- ✓ 至三十年代，松山发现日本第三纪以后的岩石约50%是反向磁化。
- ✓ 这是由于地磁场在地质时期内发生了多次的极性反转造成的。
- ✓ 正常和反转磁化岩石各占50%左右，说明地磁场具有任一极性的几率是相等的。



目 录

地磁部分章节

第五章 古地磁学

1. 古地磁学基础
2. 古地磁学工作方法

2. 古地磁学工作方法

古地磁研究最基本的工作是确定岩石的剩磁方向和强度，包括下列几项工作：

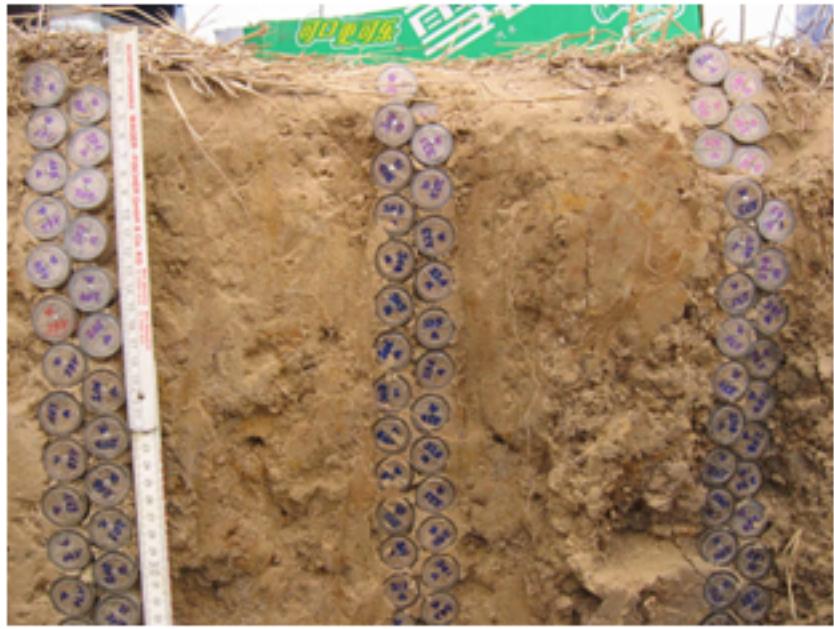
- 一、采集古地磁标本
- 二、剩余磁性测定
- 三、剩余磁性稳定性的检验及原生剩磁的判定
- 四、数据的统计整理等工作



2. 古地磁学工作方法

■ 标本的采集

- ✓ 古地磁研究的基础工作是要从被研究的岩石单元采集一套空间定向的标本。对于天然剩磁不太强的岩石露头可用一般罗盘定向。而对于那些天然剩磁比较强的岩石露头，需要用太阳罗盘定向。如果收集的岩石标本是经过变形的（如倾斜层），则还要标出由层理指示的原始水平面。
- ✓ 一个采样单元应有一定数量的采样点，这些采样点的位置应尽可能均匀分布于该单元岩层所代表的整段时代。每一个采样点要采集几个标本，每块标本又要加工成几个标准尺寸的样品。这样测得的样品天然剩磁尽可能减小由层面产状定向、标本定向、标本各向异性及样品加工过程中产生的误差。



采样方法

定向岩芯样品；定向手标本；钻孔



D026-C Core Drill



采样对象

岩石；松散沉积物；海、湖相沉积物，……





C

2. 古地磁学工作方法

■ 剩余磁性测定

在古地磁研究中，测量岩石剩磁最常用的仪器是**旋转磁力仪**和**超导磁力仪**。



主要设备：

磁清洗、岩石剩磁测量、岩石磁学



主要设备：

磁清洗、岩石剩磁测量、岩石磁学



磁清洗

原生剩磁：岩石在形成时期在地磁场作用下获得的剩磁。如火成岩获得的热剩磁、红层获得的化学剩磁，沉积岩获得的沉积剩磁等。

次生剩磁：在岩石生成以后的漫长地质年代中获得的重新磁化成分。如在地磁场长期作用下获得粘滞剩磁，在雷击、挤压、局部升温过程中获得等温剩磁、压力剩磁、低温热剩磁等。

实验室测得的岩石天然剩余磁化强度，是原生剩磁与次生剩磁的叠加。次生剩磁叠加在原生剩磁之上，使原生剩磁受到扭曲和破坏。通常采用**逐步退磁**的办法来将原生剩磁成分与次生剩磁成分分离开，这一工作称为样品的磁清洗。

磁清洗

磁清洗手段的基本假定

原生剩磁一般具有较高的稳定性，而次生剩磁的稳定性较低。在逐步退磁的过程中，样品中稳定性低的磁成分首先被退掉，而留下的不易被退磁的成分即被认为主要代表着原生剩磁。

磁清洗方法

- (1) 热退磁法； (2) 交变磁场退磁法； (3) 化学退磁法。



2. 古地磁学工作方法

■ 剩余磁性稳定性的检验及原生剩磁的判定

- 岩石剩余磁性**稳定性**是指岩石保持所获得的某种剩余磁性的能力。
- 大多数岩石的天然剩余磁性包含稳定的和不稳定的两种成分。
- 一般情况下**原生剩磁比次生剩磁**具有较强的稳定性。稳定的剩余磁性也可能是后来获得的。
- 剩磁稳定性检验包括野外检验和实验室检验。
- **野外检验**可通过剩磁方向的一致性法、褶皱法、烘烤接触法、砾岩法、倒转法等几种方法来进行。
- **实验室热退磁**法是将岩样放在无磁空间通过逐步加热和冷却的办法逐步退掉不同阻挡温度磁畴的磁性。

2. 古地磁学工作方法

■ 数据的统计整理

首先，求出统计单元的剩磁平均方向。剩余磁化强度矢量可以使用标准的矢量代数方法求平均方向。即求出平均的剩磁偏角和倾角。

然后，依据轴向地心偶极子场的假设前提下，将剩磁偏角和倾角代入相关的公式求出采样点的古纬度及其古地磁极位置。

目 录

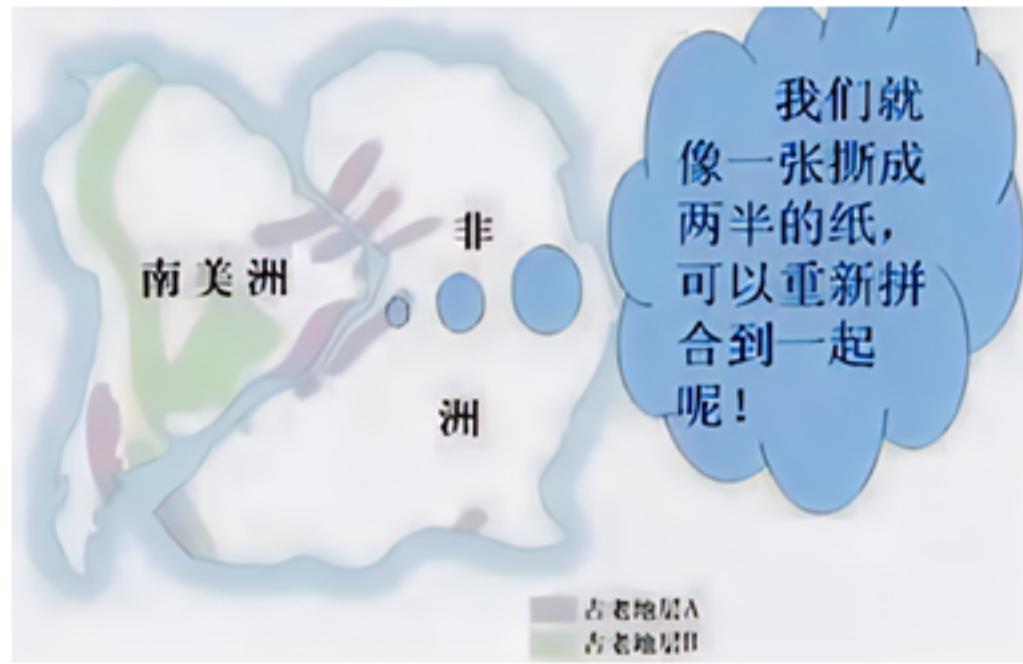
地磁部分章节

第五章 古地磁学

1. 古地磁学基础
2. 古地磁学工作方法
3. 古地磁学在地学上的应用

3. 古地磁场在地学中的应用

■ 大陆漂移的古地磁证据



Wegener, Alfred Lothar
(1880-1930)

3. 古地磁场在地学中的应用

■ 大陆漂移的古地磁证据

- 德国气象学家魏格纳1912年提出大陆漂移假说，其后引起很大争议，直到20世纪50年代初，英国地球物理学家在古地磁研究中定量证明大陆在地质年代中曾发生过漂移，从而使大陆漂移说得到复活。
- 在相当长的地质时期中，地磁场具有轴向地心偶极子场的特征。因此，利用岩石剩余磁化强度的方向计算得到的古地磁极的位置即是当时地理极的位置。

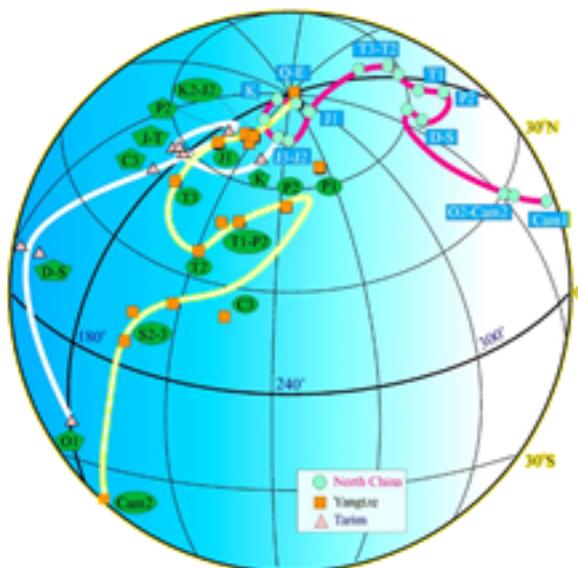


Wegener, Alfred Lothar
(1880-1930)

视极移曲线与真极移（APW path & TPW）

Creer等（1954）首次提出，被普遍使用。

- 若将某一稳定地块上各地质历史时期的古地磁极位置绘在地理坐标图上，并连成一条曲线或一个带，即为**古地磁极移曲线**。
- 假定地块固定，而认为极在移动，则它不是地磁极的**真实运动**，故称为**视极移曲线**。



- 由于轴向地心偶极子磁场假设，视极移曲线应该代表了地球旋转轴相对于观测大陆的视运动
- 真极移**：整个地球相对于旋转轴（在星系坐标中相对固定）的运动。

视极移曲线与真极移 (APW path & TPW)

- 同一时间地球就只有一个地磁极或地理极，就像由各大陆近代熔岩所求出的地磁极坐落在地理极附近一样；反之，各大陆之间地磁极的明显不整合，表明大陆之间发生过平移或旋转。
- **视极移路线是研究大陆漂移的重要证据**，从视极移曲线不仅可以了解大陆的移动和移动的方向，还可以从各大陆的视极移路线了解它们之间原生的相互关系以及分离漂移的时代。



南美、非洲大陆的视极移路线
按现代大陆分布画出（左图） 大陆拼合后画出（右图）

将南美和非洲两大陆的**视极移线（南磁极）**画在同一张图上（**左图**），两条视极移路线**明显地不重合**，但是两条路线的**趋势十分相似**，都是从赤道附近随着年代由老到新渐渐靠拢，最终相交于南磁极。南美视极移路线始终是在非洲的西部，正像南美大陆位于非洲大陆之西一样。



南美、非洲大陆的视极移路线
按现代大陆分布画出（左图） 大陆拼合后画出（右图）

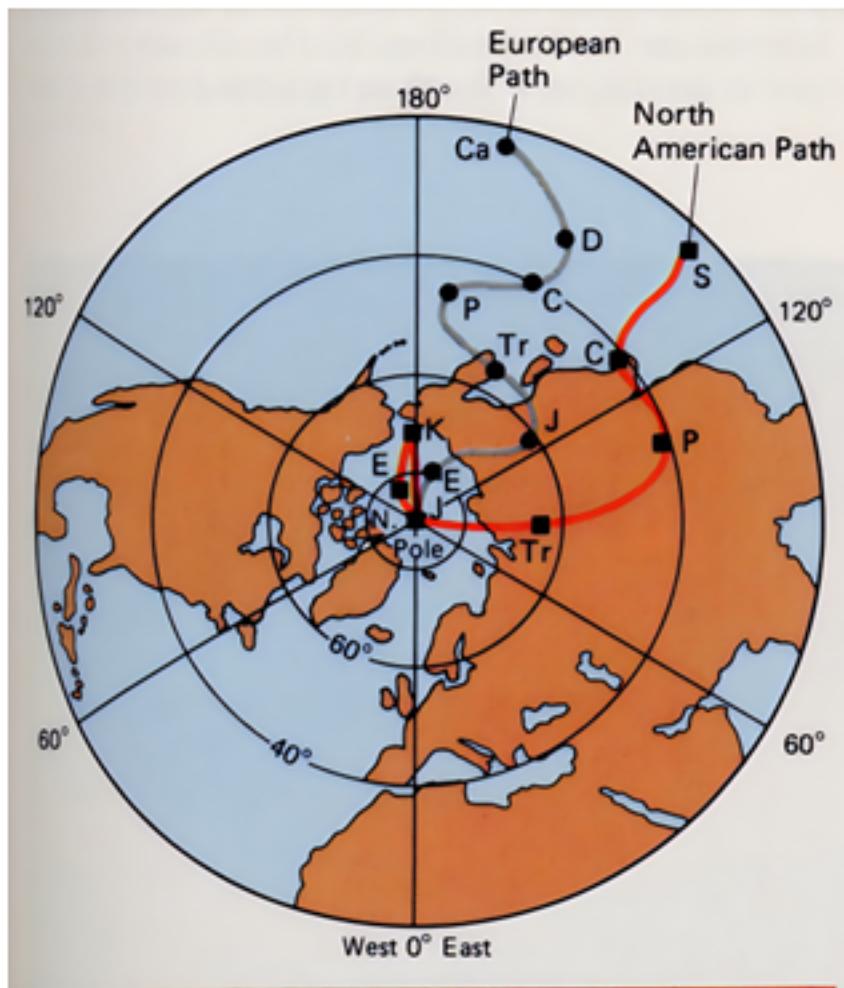
如果将非洲大陆固定不动，按照大陆架的形态，将美洲大陆向东移动，与非洲大陆拟合，它的视极移路线也随之东移，中生代以前两大陆的视极移路线基本吻合，中生代以后的视极移路线却分道扬镳了。



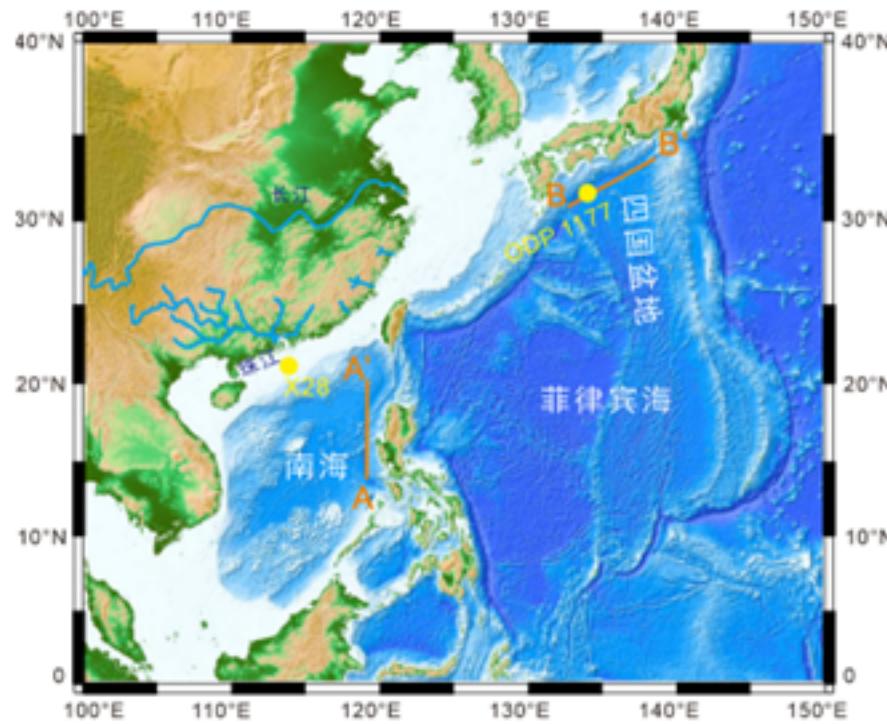
南美、非洲大陆的视极移路线
按现代大陆分布画出（左图） 大陆拼合后画出（右图）

这一古地磁研究成果证明，非洲大陆和南美大陆在古生代时是连在一起的，当时并不存在大西洋。**中生代（侏罗纪）开始分裂，南美大陆向西漂移，并兼有顺时针方向的旋转，形成了现今两大陆的分布状态。**

- 欧洲和北美的两条视极移曲线，不同但趋势相似。
- 若以北极为中心将北美连同它的视极移曲线一起向东旋转38度，则北美和欧洲大陆架相闭合，北大西洋消失。**志留纪到二叠纪一段重合得好，但是，到三叠纪以后，两条视极移曲线分开。**
- 说明**三叠以前，欧美相连组成欧美古陆。侏罗纪以后，欧美分离，形成大西洋。**

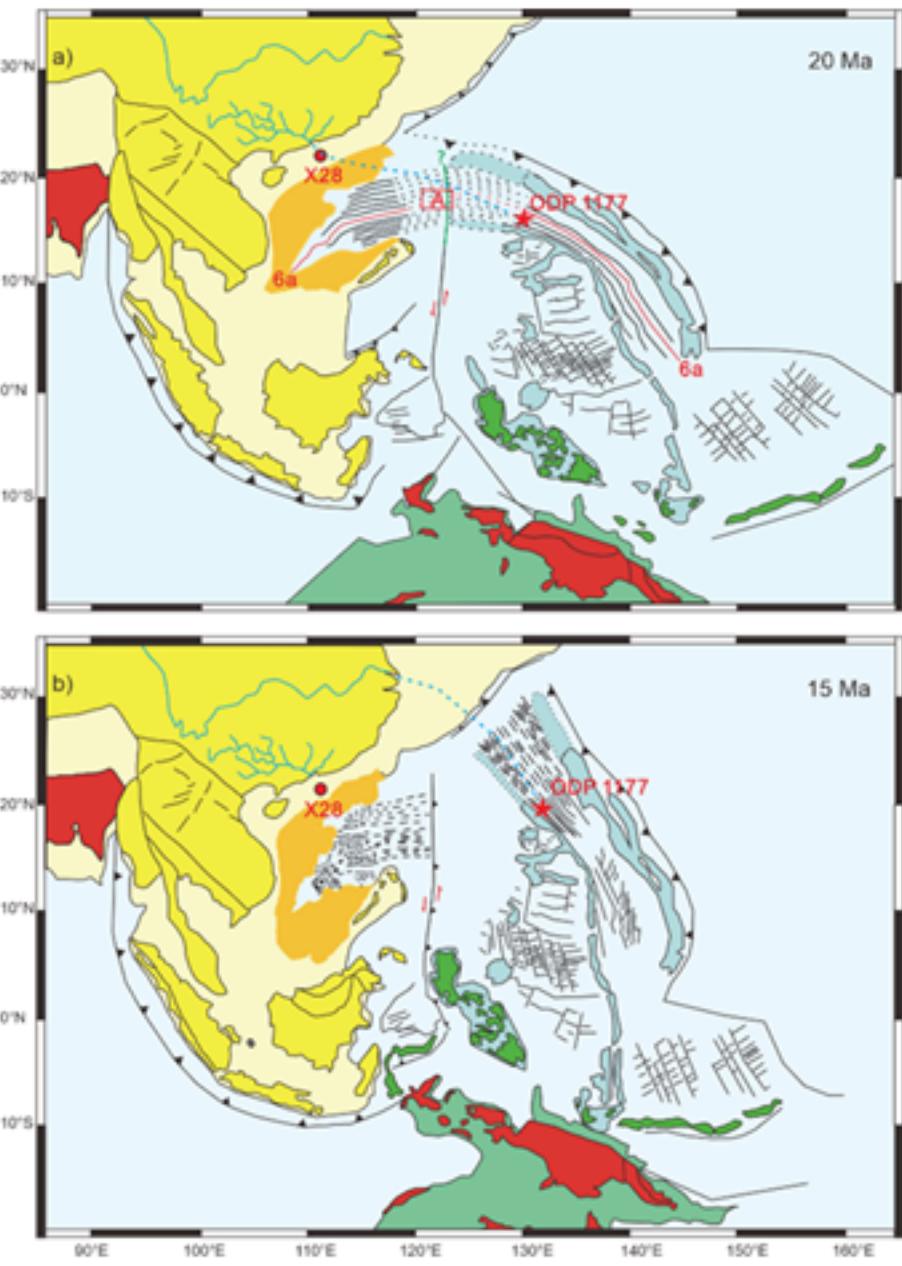


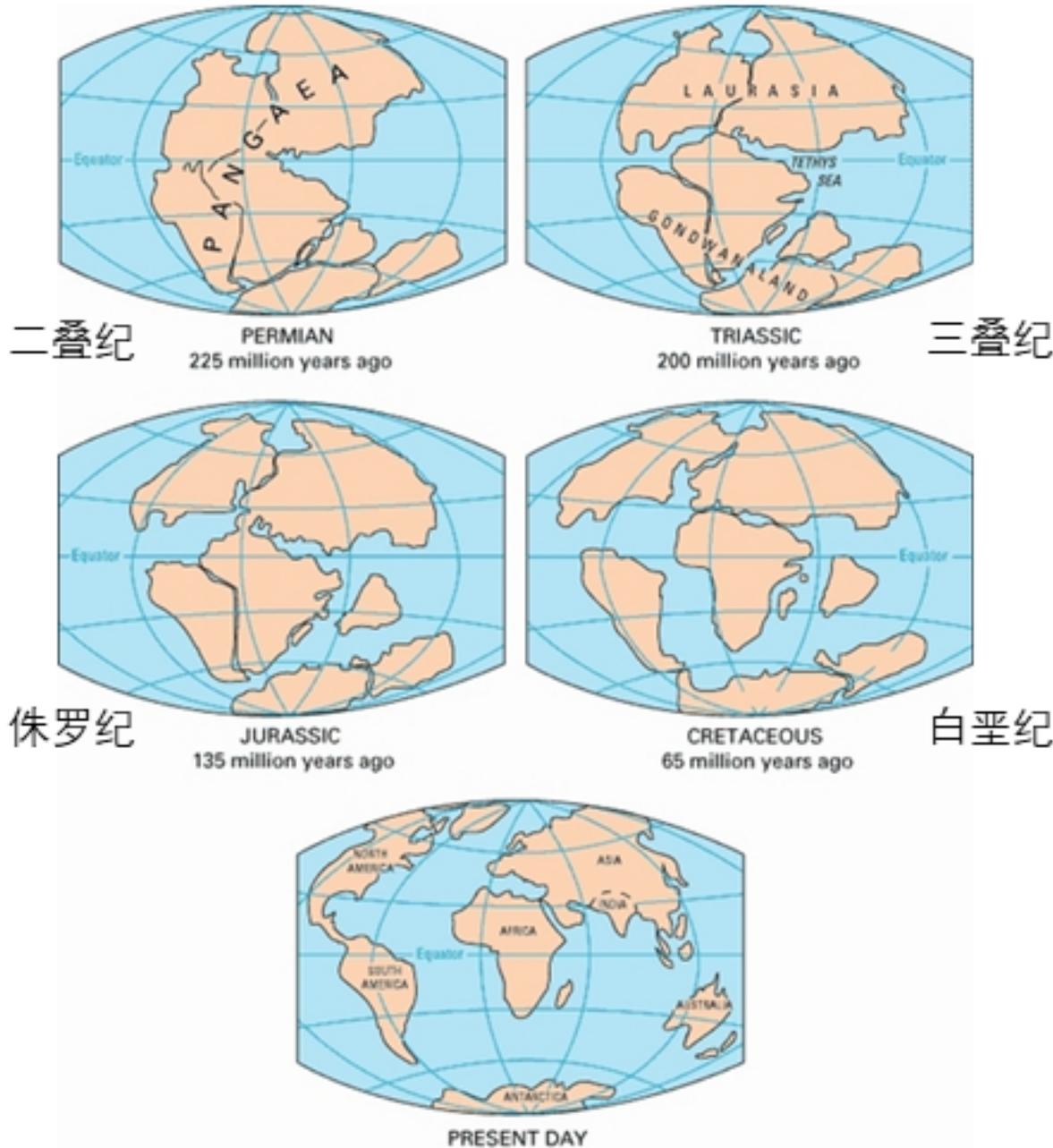
欧洲和北美视极移曲线



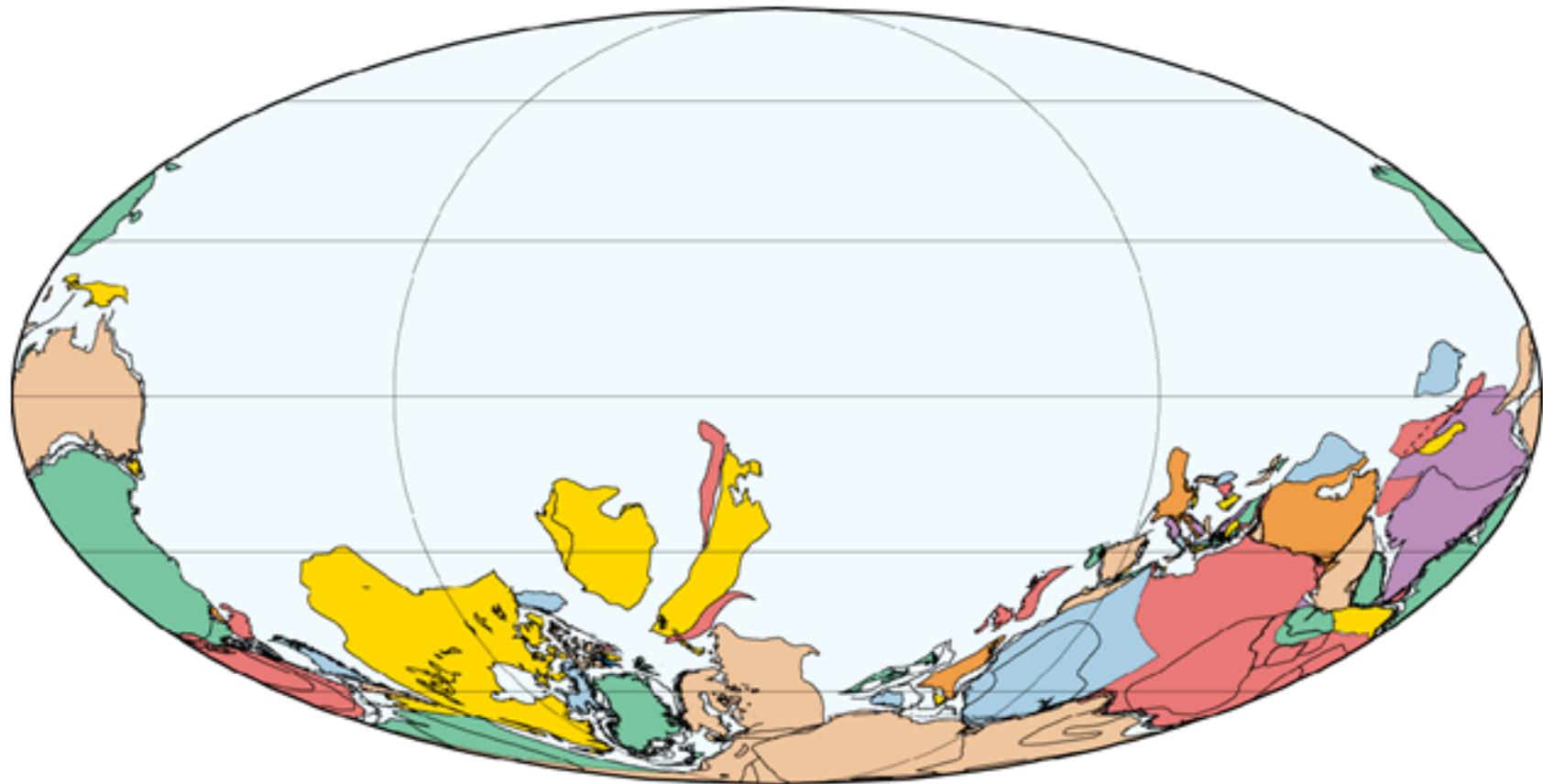
南海与菲律宾海四国盆地
在20Ma连在一起

南科大海洋磁学中心 (2021)





古地理重建



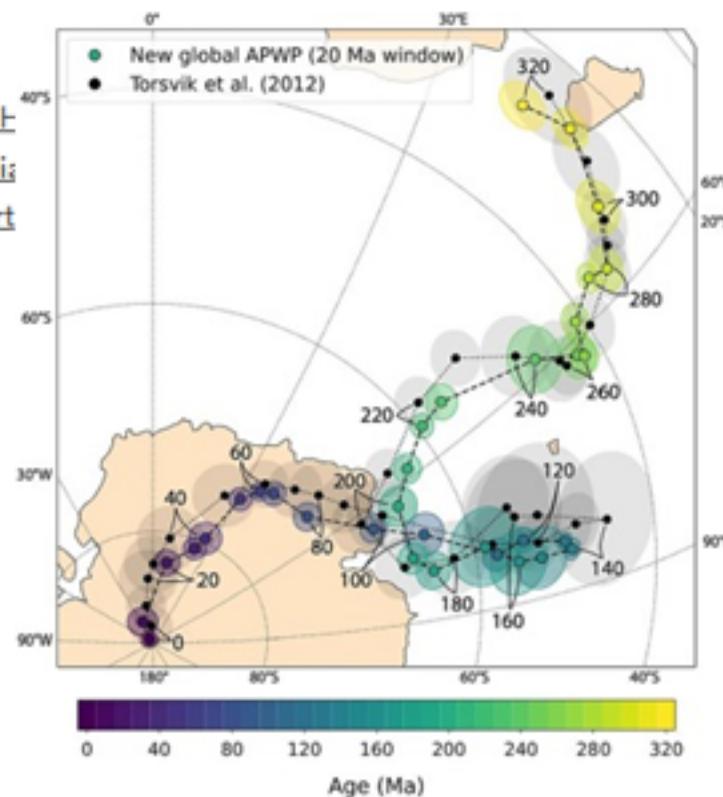
600 Ma

Late Proterozoic



A global apparent polar wander path for the last 320 Ma calculated from site-level paleomagnetic data

Bram Vaes ^a , Douwe J.J. van Hinsbergen ^a, Suzanna L Erik van der Wiel ^a, Nalan Lom ^a, Eldert L. Advokaat ^{a b}, Lydia Annika Greve ^a, Carl Guilmette ^d, Shihu Li ^e, Peter C. Lippert Cor G. Langereis ^a

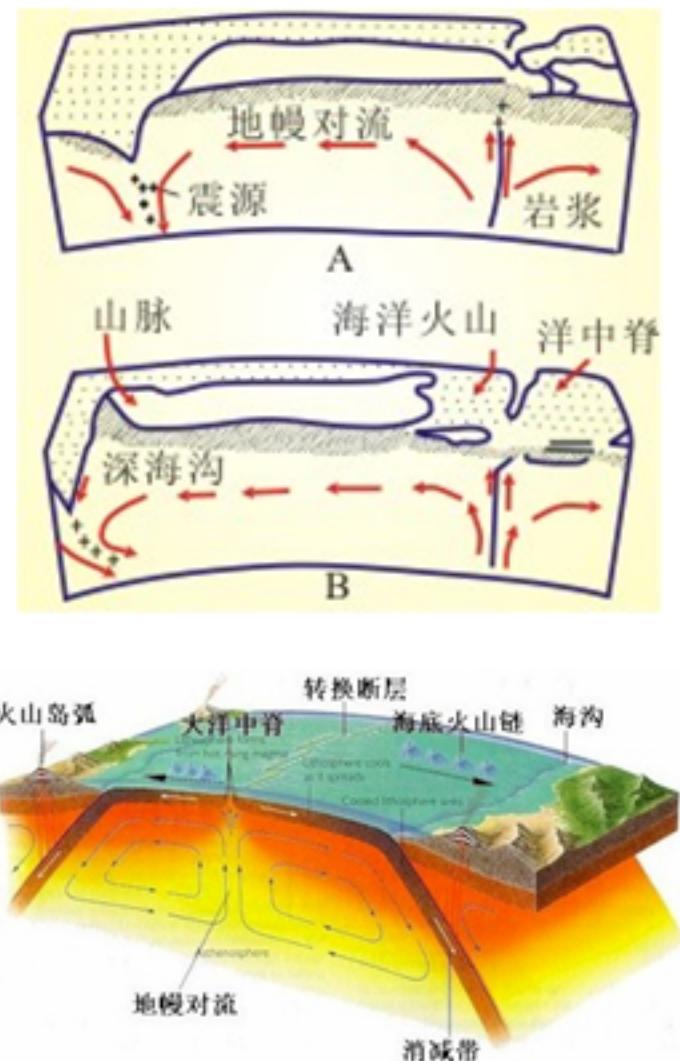


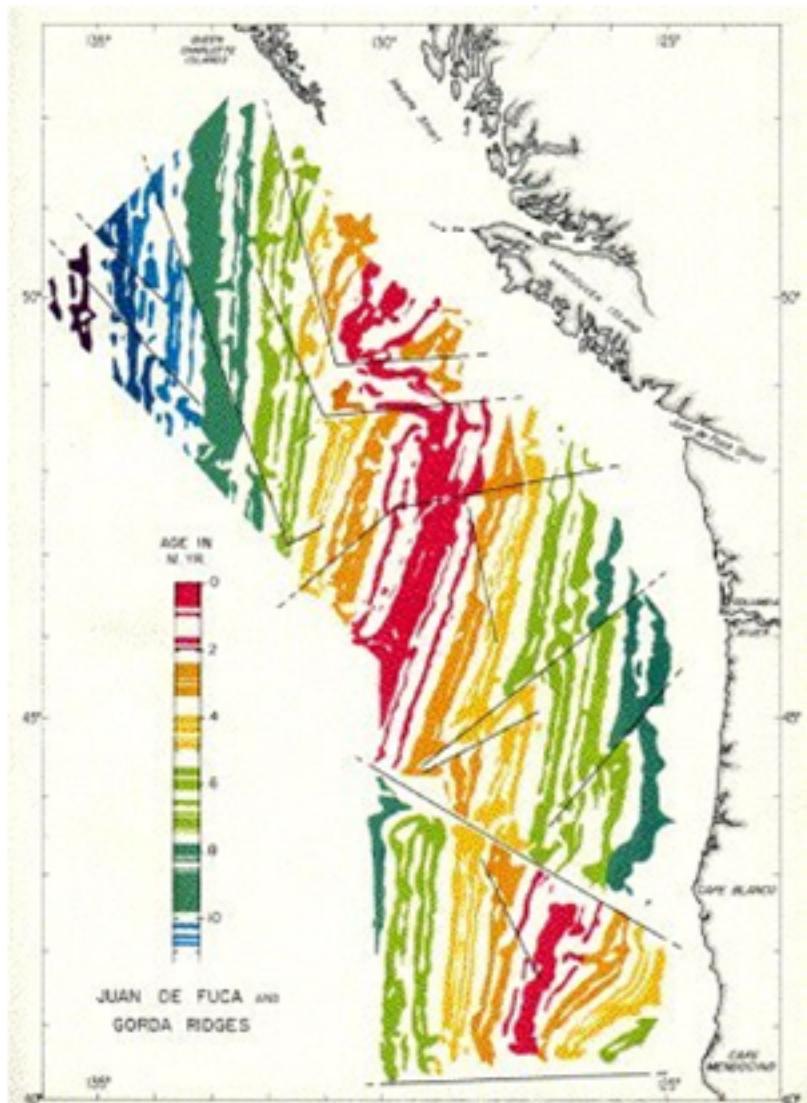
3. 古地磁场在地学中的应用

■ 海底扩张的古地磁证据

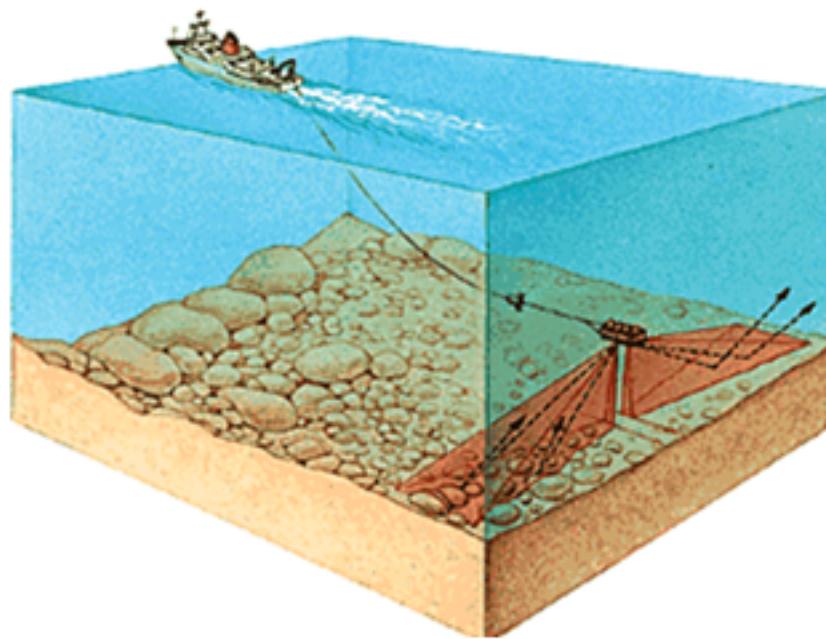
威尔逊利用**地幔对流**和**海底扩张**假说全面地说明了大陆漂移的设想。

新形成的地壳和覆盖于其上的火山，逐渐被分为两边，移动；当一个前进的大陆遇到下降的对流体时，运动必然停止，在较轻的大陆地壳的前沿堆积起来形成**山岳**；同时，由于洋底受到下降对流体的向下拖曳，便形成**海沟**。



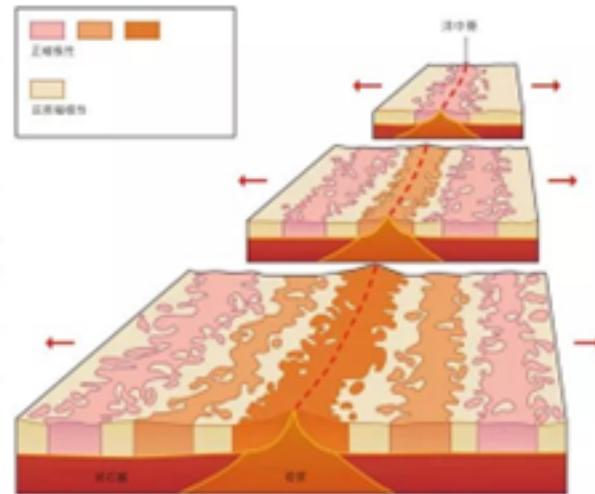
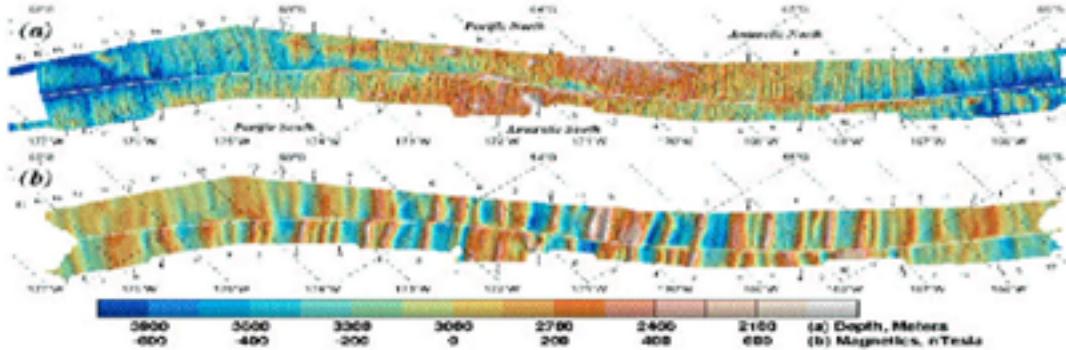


Raff & Mason (1961) GSA Bulletin

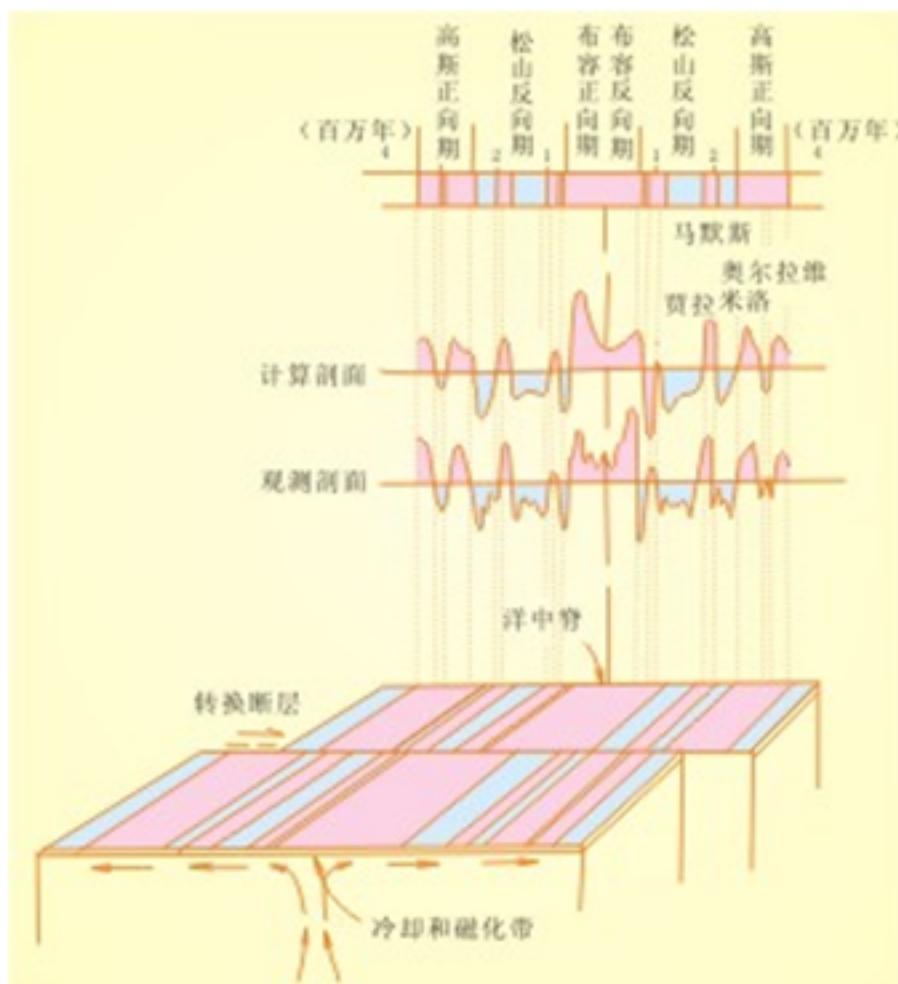


上世纪50年代后半期，英国学者梅森等在磁法调查中发现大洋底存在独特的线性磁异常。

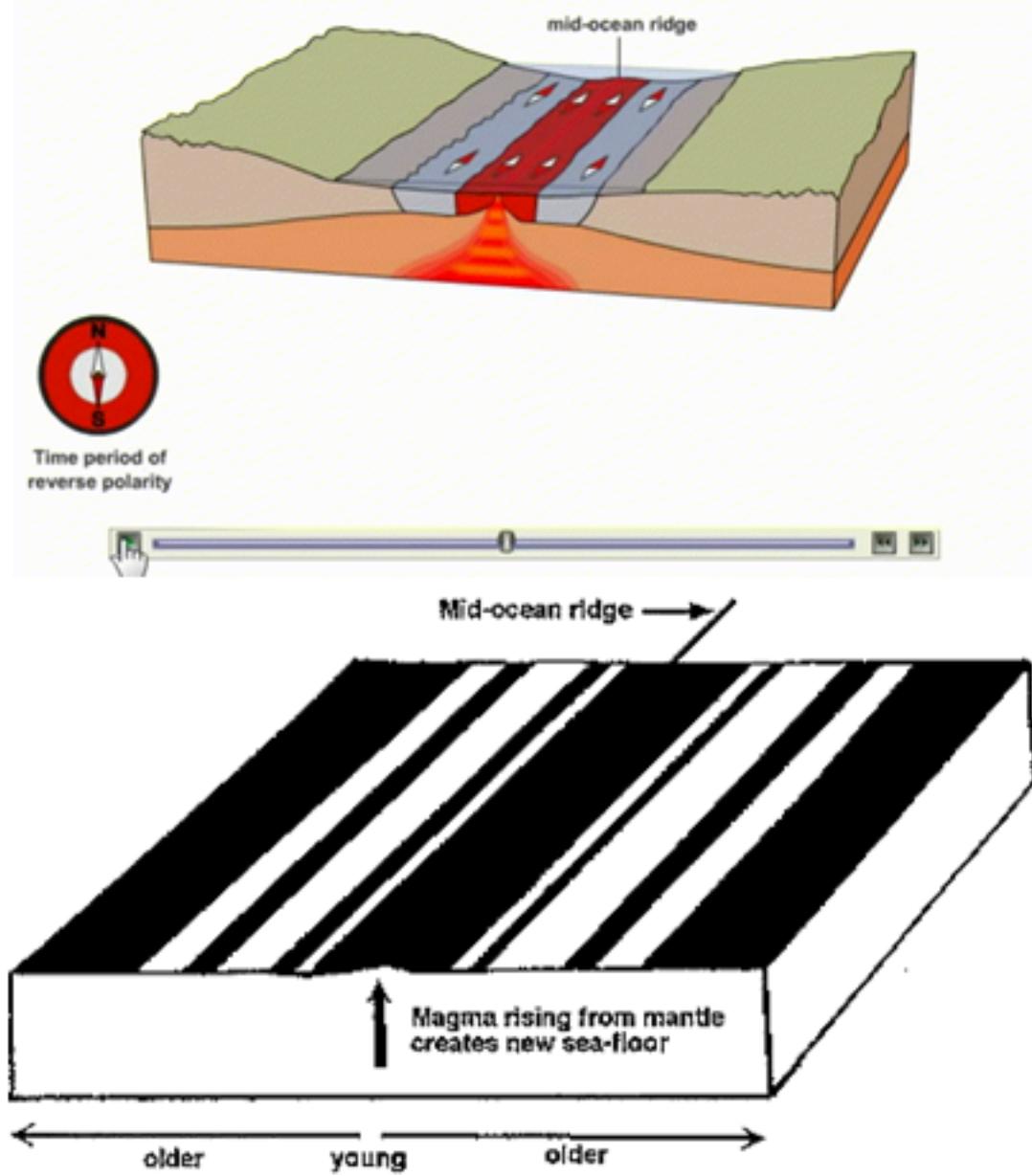
- ✓ 20世纪50年代以来，大规模的航磁测量，发现海洋磁异常具有以下特征：(1)磁异常呈条带状分布，条带的走向与洋脊平行；(2)正负异常相间，带宽20-30 km，长几百km，异常幅值几百nT；(3)磁异常对称于洋脊分布。这称为**海洋条带状磁异常**。
- ✓ 海洋条带状磁异常的发现和解释，对海底扩张假说是有有力的支持。**地磁极性翻转**定量解释了海底条带状异常和海底扩张假说。



- ✓ 1963年瓦因和马修期提出一种假设：地幔的炽热物质，以对流方式上升到洋脊，冷却经过居里点时，获得与当时地磁场方向相同的**热剩余磁性**。对流体不断上涌，推着老海底向两侧扩张，在洋中脊形成新的洋底。
- ✓ 海底在扩张过程中，地磁场发生多次**翻转**，在正常地磁场形成的海底具有正向磁化；在反向地磁场形成的海底具有反向磁化。与海岭距离不远的海底，是由正、反磁化相间的磁性岩层组成。
- ✓ 磁异常在海岭两侧的**对称性**，是海底两侧扩张速度相等的结果。



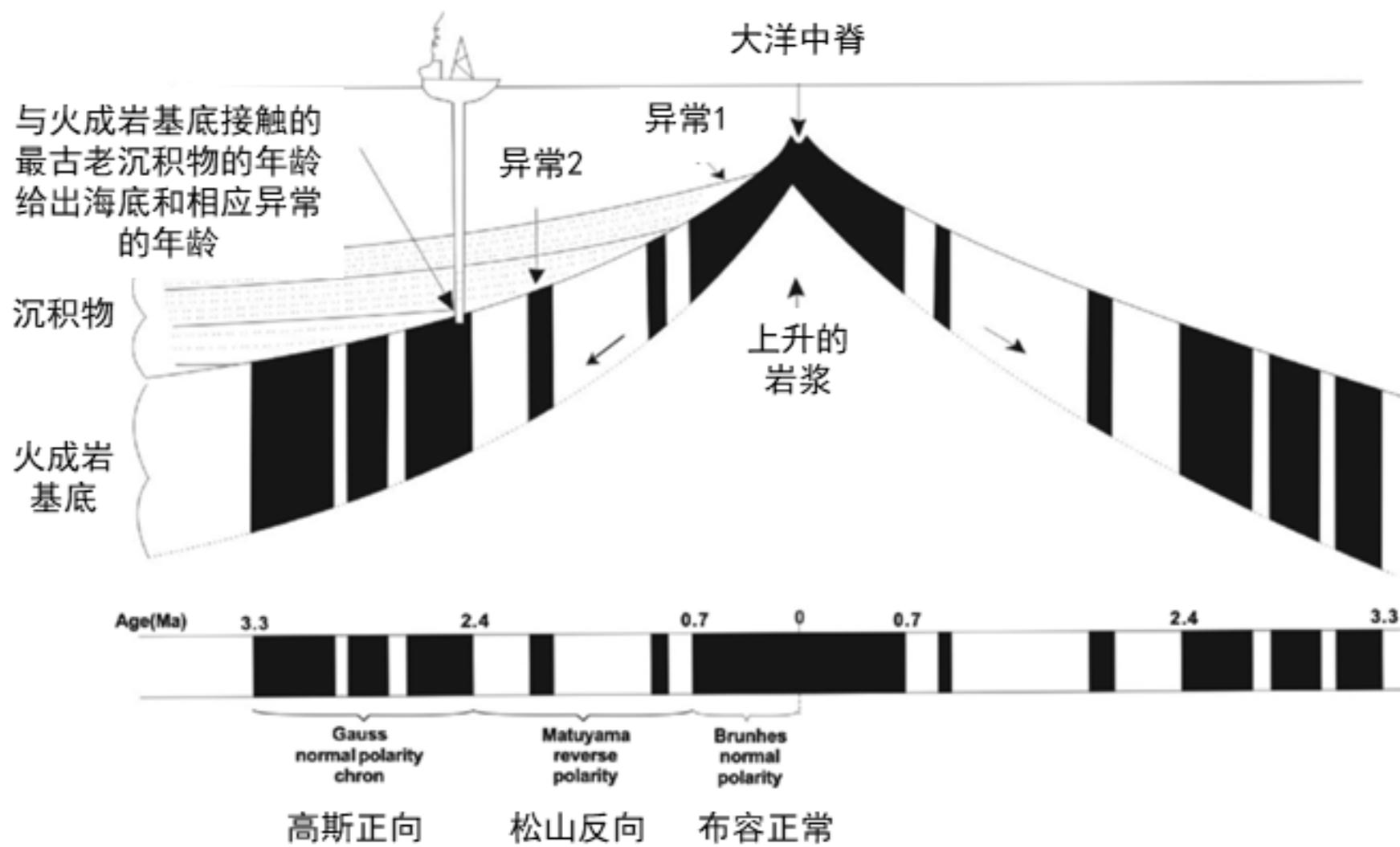
Sea-floor spreading and sea-floor magnetization



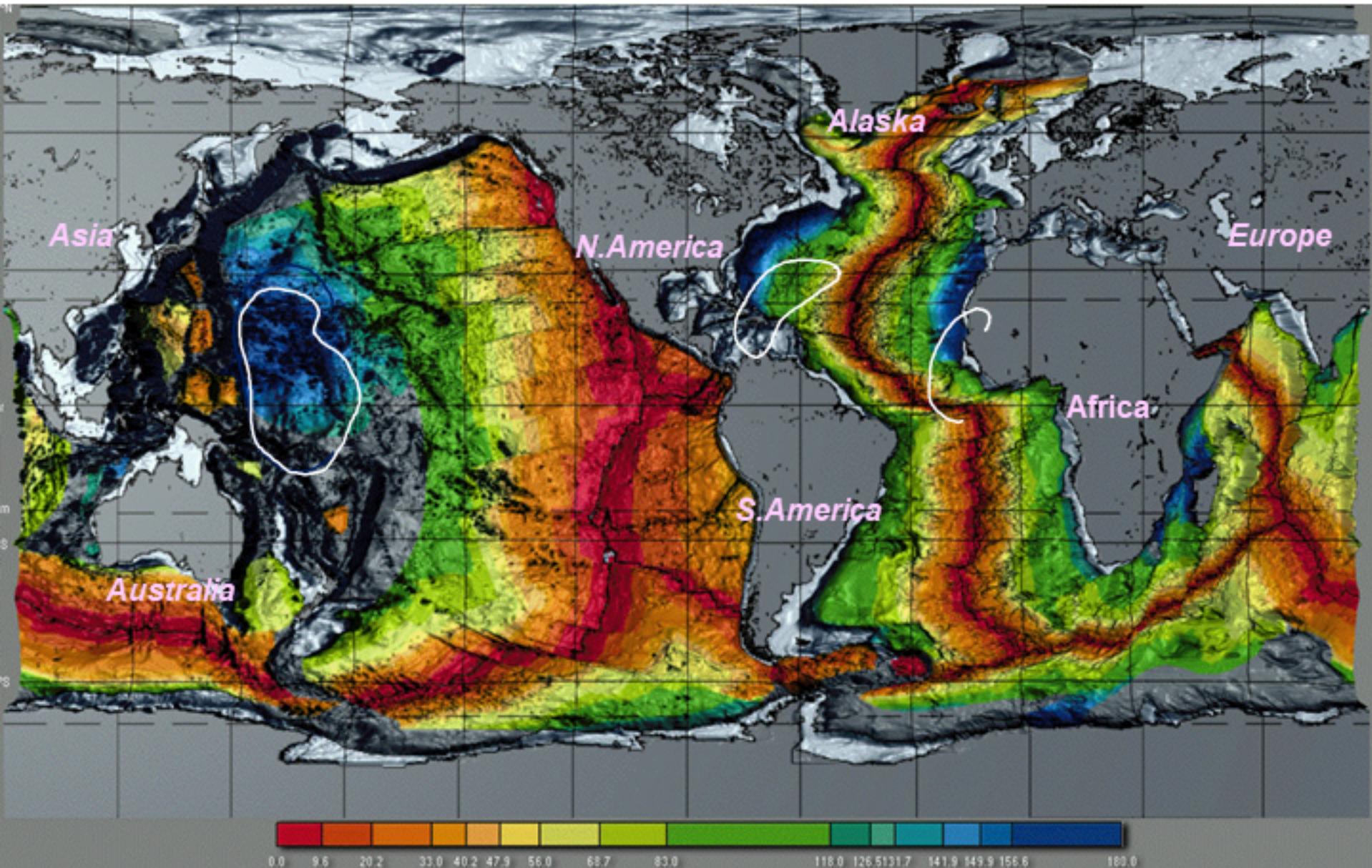
黑色：正极性，
现今地磁场的方向；

白色：负极性，
与现今地磁场方向相反

人们如何了解洋壳的年龄？



洋壳的年龄



3. 古地磁场在地学中的应用

■ 研究地质构造运动

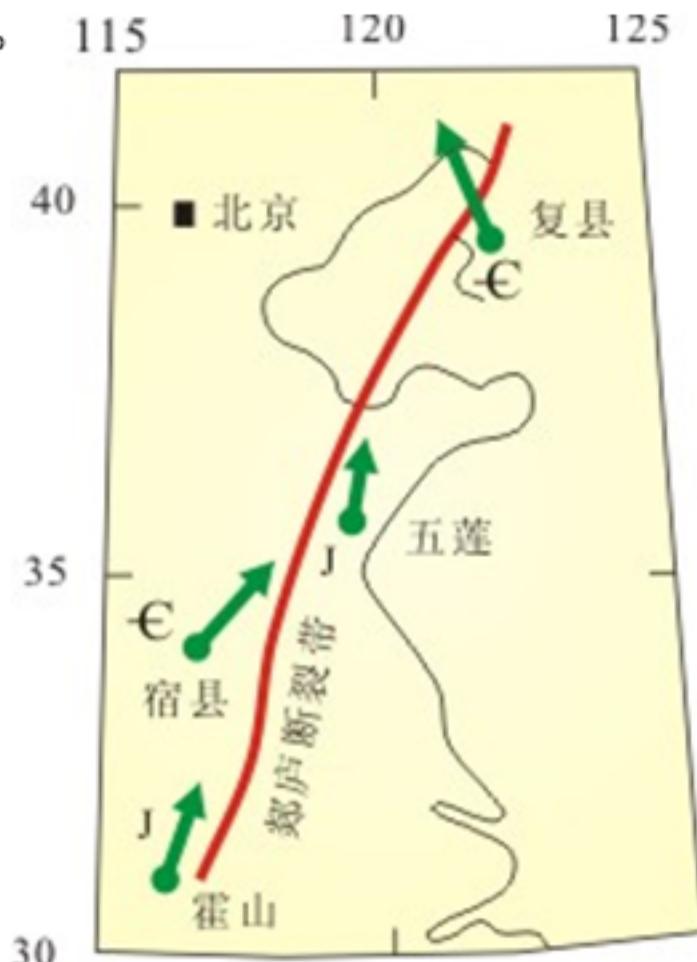
岩石形成时获得原生剩磁以后，如果发生构造运动，致使处于构造不同部位的岩石之间改变了它们生成时期的相对位置。这样，保存在岩石中和稳定的原生剩磁也随着岩石载体一起改变其空间位置。

如果我们测定现代处于构造各个不同部位的岩石中的稳定剩磁方向，找出它们之间方向相对变化规律，就可以反过来推断和验证该构造运动发生的方式和方向。

郯城-庐江深大断裂，多数学者认为它是左旋平移断层。但是，对平移的时间和距离，却有不同的看法。

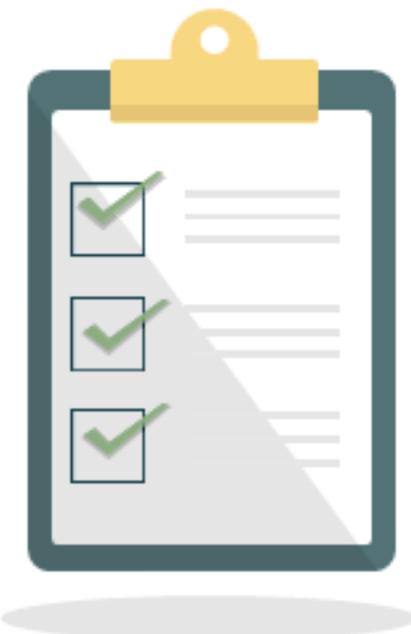
对断裂带东西两侧的寒武纪、侏罗纪地层进行的古地磁测量，为解决上述问题提供了有意义的资料。

- ✓ 在断裂带东侧，**复县**早寒武世磁偏角338，五莲晚侏罗世磁偏角70，说明后者相对前者顺时针旋转290。
- ✓ 断裂带西侧宿县早寒武世磁偏角420，霍山晚侏罗世偏角170，则后者较前者逆时针旋转250。
- ✓ 上述表明，断裂带两侧地壳各自有独立的运动方式，至少在侏罗纪前，两侧地层已发生过相对运动。



小节

- 古地磁学的两个基本前提
- 古地磁研究的基本工作方法



课后习题

- 洋中脊的磁测工作发现了什么
- 古地磁如何验证大陆漂移假说



课程结束

陈涛

