

地磁学与地电学

——绪论

陈 涛

地球物理学院
中国石油大学（北京）

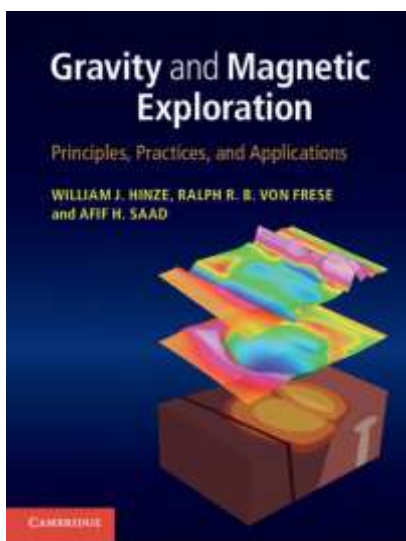
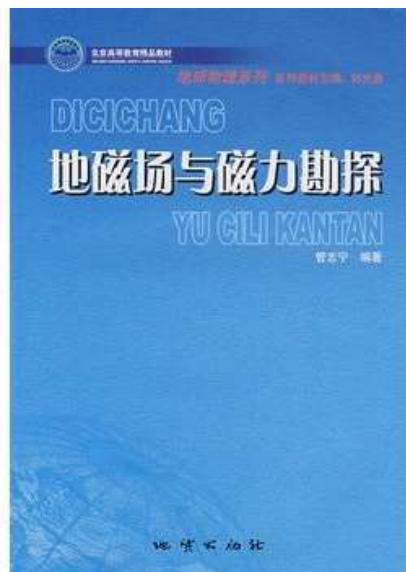
2024/3/10

考核

考勤	平时成绩	期末考试
10%	30%	60%

- 平时成绩：课堂表现，平时作业，实践课
- 鼓励同学们提出对课程的建议和意见

参考资料



1. 《应用地球物理教程——重力、磁法》，罗孝宽、郭绍雍主编，1991，地质出版社
2. 《重磁勘探反演问题》，曾华霖等编译，1991，石油工业出版社
3. 《重磁资料数据处理程序分析》，曾华霖，1985，地质出版社
4. 《磁法勘探重要问题理论分析与应用》，管志宁等，1993，地质出版社
5. 《区域磁异常定量解释》，管志宁，安玉林，1991，地质出版社
6. 《场论》，薛琴访。1978，地质出版社

参考资料

1、英文期刊：

《Geophysics research letters》

《Journal of Geophysical research》

《Geophysics》

《Geophysical Journal International》

《Reviews of Geophysics》 等。

2、中文期刊：

《中国科学（D辑）》

《地球物理学报》

《地球物理学进展》

《石油地球物理勘探》

《石油勘探与开发》 等。

符号说明

标量采用 *斜体*，矢量和矩阵采用 **加粗字母**

名称	符号
磁化率	κ
磁场强度	\mathbf{H}
磁感应强度	\mathbf{T}
磁化强度	\mathbf{M}
磁矩	\mathbf{m}
磁位	U
引力位	V

课前测试

- 地球物理学中常用的几类方法？
- 简述你所了解的地球圈层结构？
- 地球周围都有哪些场？
- 简述你对磁场/磁力/磁性体的认识。



为什么会有地磁学

- 地球具有磁场——地磁场
- 自然界的岩石和矿石具有不同的磁性，受地磁场磁化产生不同的磁场——磁性体磁场
- 二者叠加使地磁场在局部地区发生畸变—— 磁场异常
- 应用地磁学——通过观测和分析因岩矿石的磁性差异引起的磁场异常——研究地质构造及其分布和寻找矿产能源。
- 发展最早、应用最广的一种地球物理方法，用于固体矿产、石油天然气构造的普查、地质填图及地质构造研究。

为什么会有地磁学

- 理论基础——地球磁场与岩石磁性
- 数据观测——磁力仪与工作方法
- 数据处理与解释——磁场的叠加性、磁场与磁源的关系
场源的情况——地质认识

目 录

地磁部分章节

第一章 地球磁场

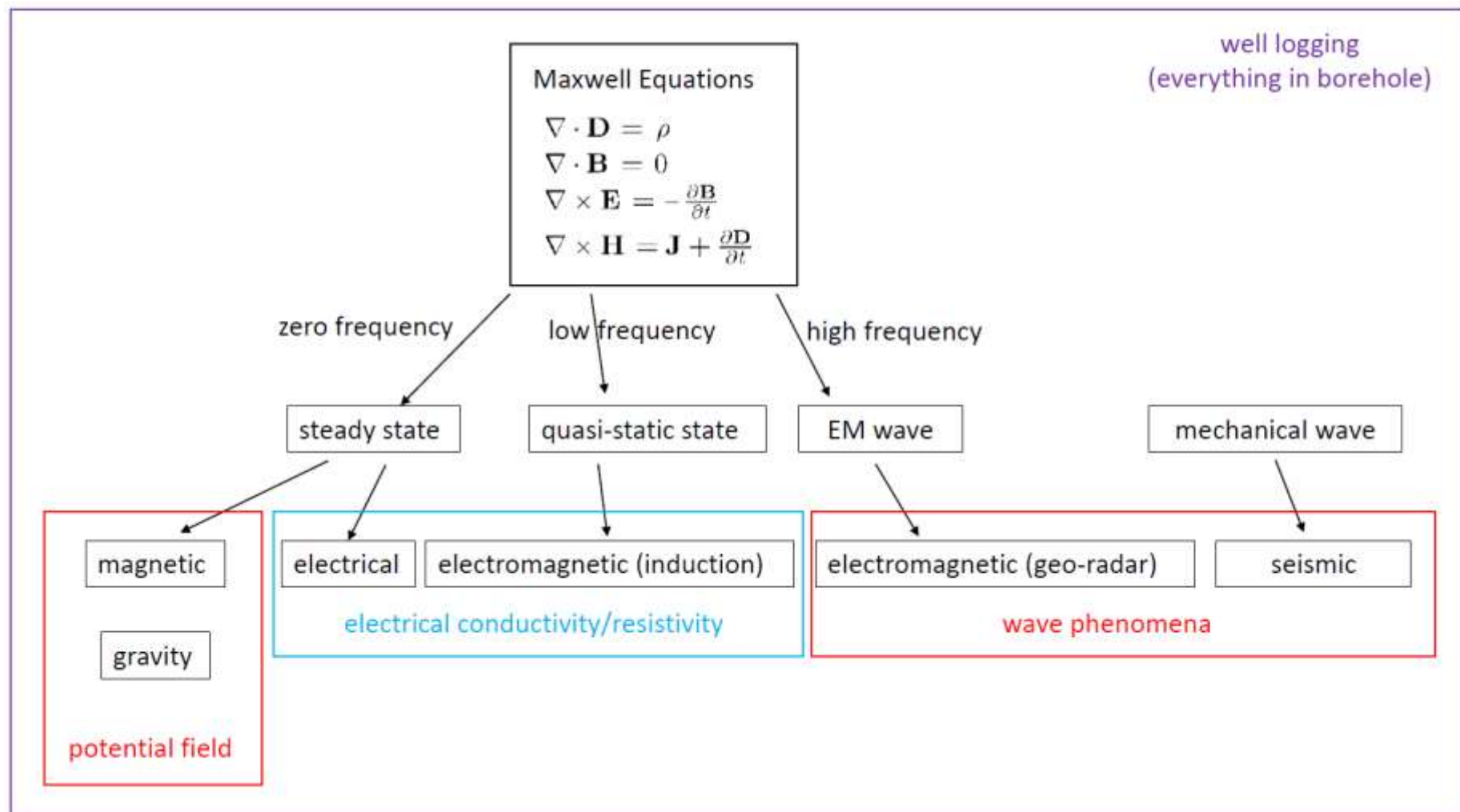
第二章 磁力仪与磁力测量

第三章 磁力资料整理、处理与反演

第四章 磁力资料解释与应用

第五章 古地磁学

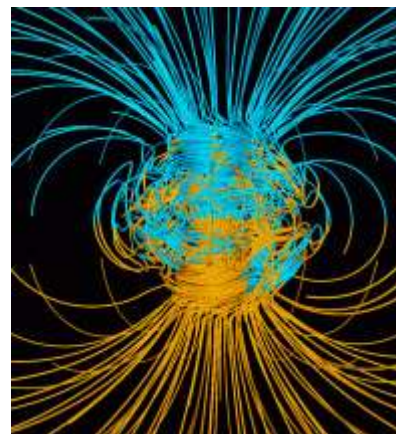
课前知识



(源自杨迪琨, 南方科技大学)

课前知识

- 地球具有磁场，地球上岩石、矿石具有不同的磁性，可以产生不同的磁场，使地球磁场在局部地区发生变化，出现磁场异常。
- 地磁学主要研究地磁场空间分布和随时间变化的规律，以及地磁场的组成、起源和应用。



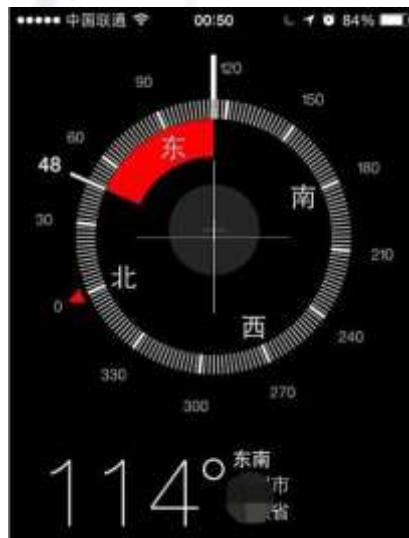
目 录

地磁部分章节

第一章 地球磁场

1. 人类对于地磁场的认识

1. 人类对于地磁场的认识



1. 人类对于地磁场的认识



- 两千年前，我们祖先发现天然磁石的吸铁性和指极性
- “阿房前殿，以木兰为梁，磁石为门，怀刃者止之”（《三浦皇图》）
- “夹道累磁石，贼负铁铠者，不得前”（《晋书》）

1. 人类对于地磁场的认识



- 《梦溪笔谈》（沈括，1031—1095）中写道：“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也”；
- 北宋时已将指南针用于航海（“舟师识地理，夜则观星，昼则观日，隐晦则观指南针”——《萍洲可谈》）；

我们古代关于磁铁性质的知识传入欧洲后，欧洲才开始对地球磁场的研究。

1. 人类对于地磁场的认识

- 英国人吉尔伯特 (William. Gilbert) 1600年出版了物理学史上第一部系统性阐述磁学的科学专著《论磁石》提出：磁针指南性质和地球类似一个大磁铁；磁动势的单位吉伯 (Gilbert) 就是以他的名字命名。



吉伯

- 1640年，瑞典人首次尝试用罗盘寻找磁铁矿，开辟了利用磁场变化来寻找矿产的新途径。

地磁学是应用最早的地球物理方法。

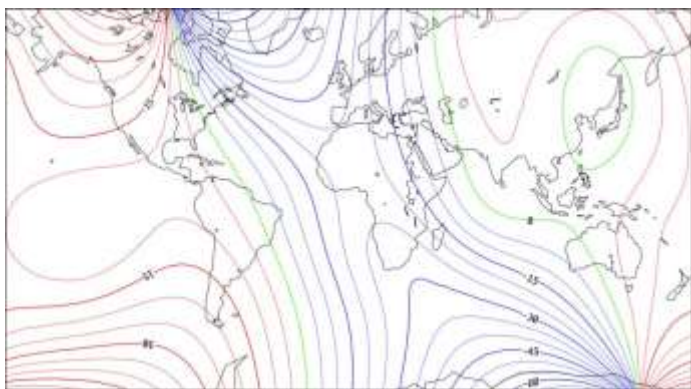
1. 人类对于地磁场的认识

- 1832年，高斯建立了地磁场的球谐分析方法，证实了关于地磁场起源于地球本身的论断，奠定了地磁场分析的理论基础。
- 1840年高斯与韦伯一同画出世界上第一张地球磁场图

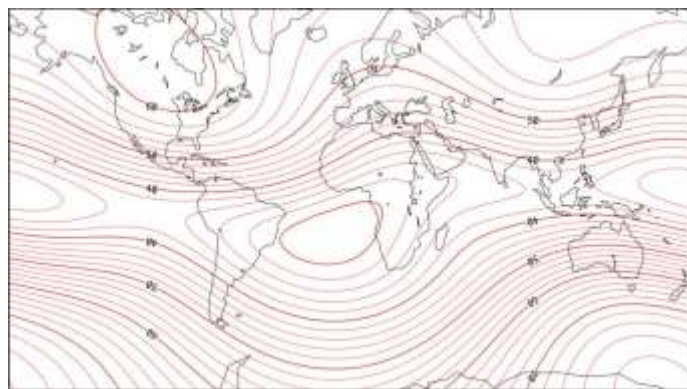


高斯

磁偏角



总场强度



地磁学的里程碑

1. 人类对于地磁场的认识

- 1870年，瑞典人泰朗（Thalen）和铁贝尔（Tiberg）制造了万能磁力仪——（测量地磁场的相对变化）

应用地球物理学开始的标志



Thalen-Tiberg magnetometer

- 1879, Thalen发表:
“The Examination of Iron Ore Deposits by Magnetic Measurements”

第一篇地球物理学论文

1. 人类对于地磁场的认识

- 1915年，施密特（Adolf Schmidt）制作刃口式磁力仪，大大提高了磁测精度——不仅可以找磁铁矿，还可以研究地质构造、圈定岩体以及寻找与油田有关的岩丘；

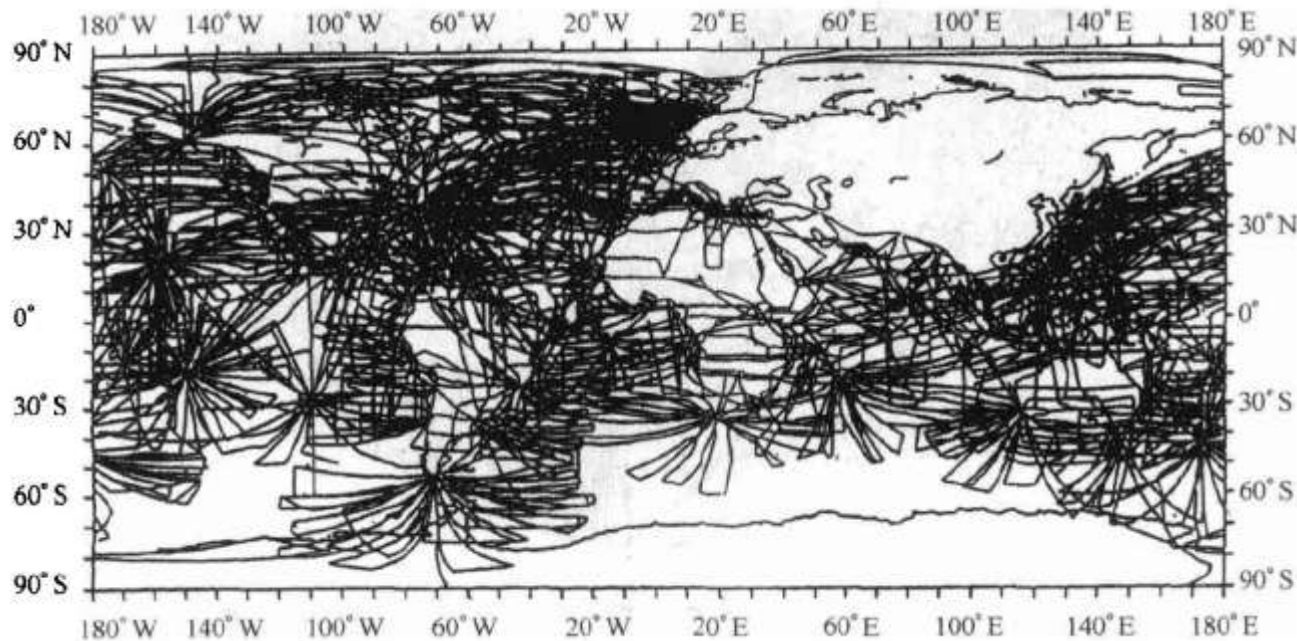


- 1930s，前苏联罗加乔夫（A. A. Логачев）研制成功感应式航空磁力仪，开展航空磁测——大大提高磁测速度和磁测范围；



1. 人类对于地磁场的认识

规模最大的区域性航磁测量是美国海军在1950~1990年的“磁铁”计划中完成的，其目的是为了编制全球地磁图，其是舰船导航必需的图件。



美国航空磁测“磁铁”计划航线图

1.人类对于地磁场的认识

- 1930s, 我国开始磁法工作:
- 1939年, **顾功叙**在云南易门铁矿, **李善邦**、**秦馨菱**在四川綦江铁矿用磁秤找矿。
- 20世纪50年代, 我国先后在: 山东金岭镇、辽宁鞍山本溪、湖北大冶、内蒙古白云鄂博、山东莱芜、河北邯郸邢台、四川攀西等地区开展磁法找铁矿工作。1954年开始投入航磁。
- 我国80%以上的铁矿是通过磁测发现 (或扩大)



顾功叙

1. 人类对于地磁场的认识

- 磁法找其它矿产（铁伴生矿产）：

1. 安徽铜陵、湖北铜录山的**矽卡岩型铜矿**；
2. 吉林红旗岭、甘肃白家嘴子、新疆喀拉通克的**硫化铜镍矿床**等；
3. 在内蒙古、新疆、西藏等地的**铬矿**，山东、辽宁等地**金刚石岩管，硼矿、石棉**等矿产的发现和圈定起到重要作用



顾功叙科技发展奖

傅承义青年科技奖



翁文波、顾功叙、傅承义

1. 人类对于地磁场的认识

- 二十世纪以来，利用地磁测量所发现的各种地磁异常的研究，证明它们与地壳的地质构造与磁性有关的矿产分布有密切的关系，即固体地磁学和应用地磁学。
- 通过岩石及古代文物的磁性来研究史前与地质时期地磁场性质、特征，即古地磁学，对于地质构造运动、地层对比、地磁场长期变化以及地磁场起源等的研究具有重要意义，特别是在研究大陆漂移、海底扩张及全球构造体系—板块构造学说的树立起到了关键性作用。

推动了地学理论的大变革、大发展！

地磁学

- 应用地磁学（勘探地磁学/磁法勘探）
- 固体地磁学
- 古地磁学
- 空间地磁学

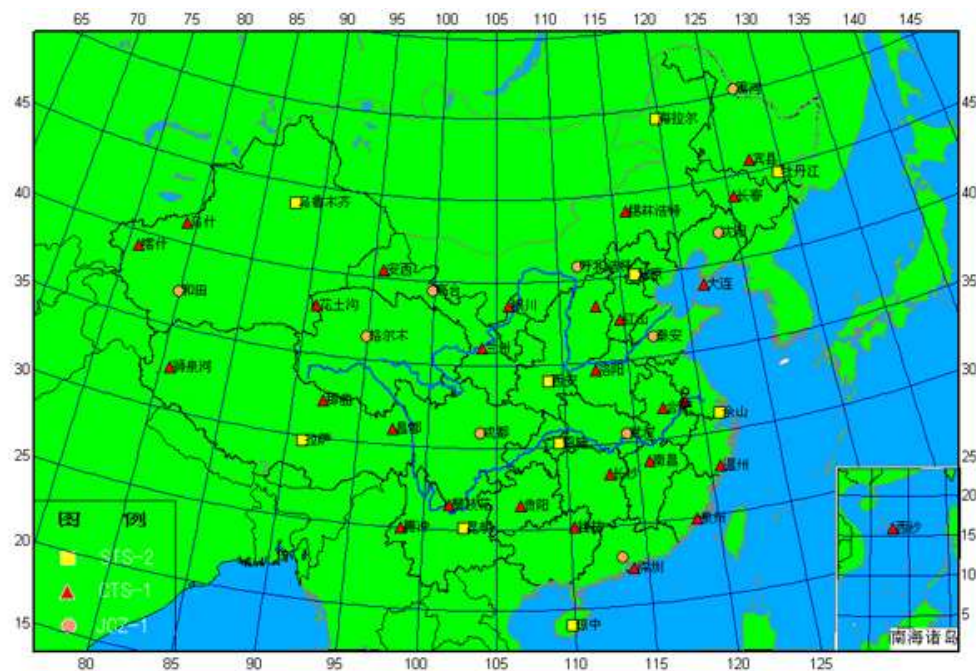
1. 人类对于地磁场的认识

- 19世纪20年代世界上建立了第一批地磁台，开始了大范围内连续的地磁测量，为全面了解和研究地磁场的时空分布特征以及各类地磁现象起到了很大作用。



1. 人类对于地磁场的认识

- 我国最早的地磁台于1870年建于北京，1874年上海又建成了地磁台。1957年以后，陆续建立了一批地磁台，形成了**全国的地磁台网**。随着我国地磁台网和地磁测量的日益发展和完善，我国的地磁学的各项研究工作，必将取得更大的进展。



中国地磁 / 地球物理台网

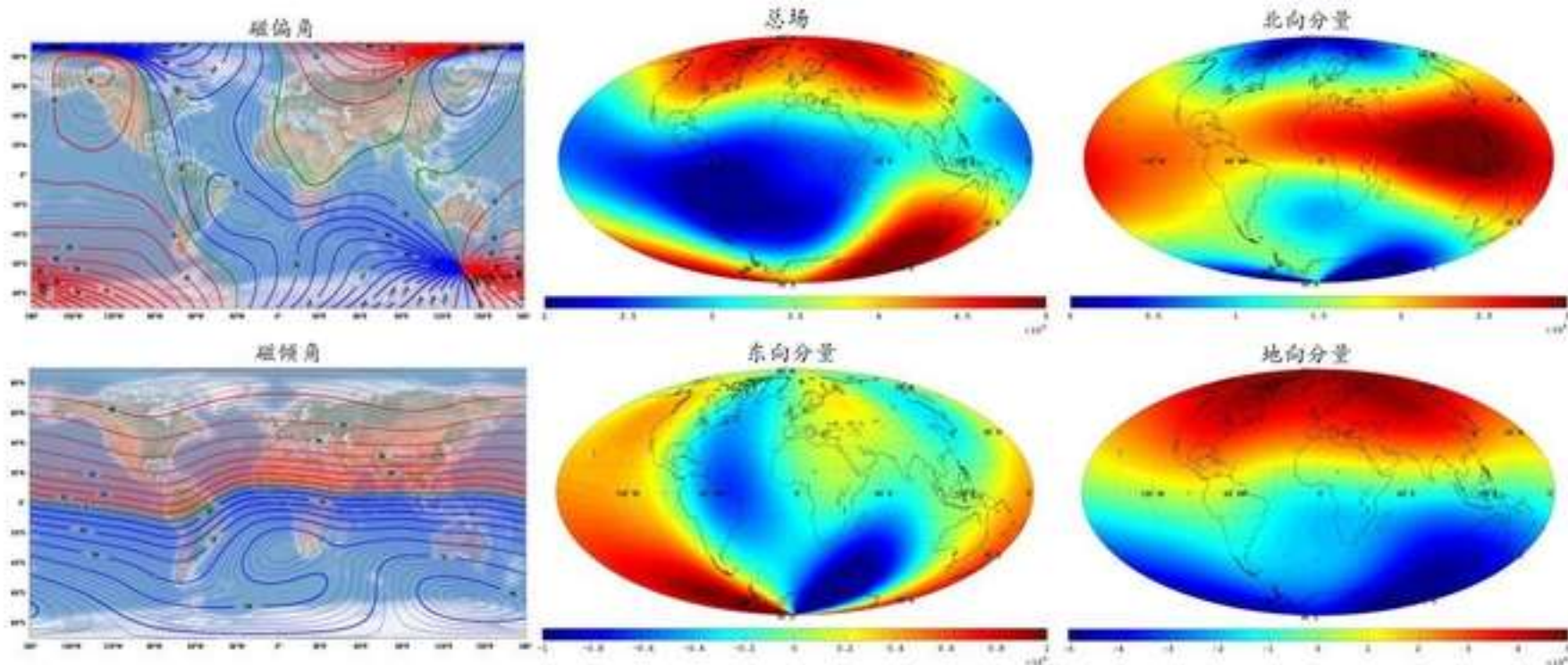
1. 人类对于地磁场的认识



2018年，我国首个地震电磁监测卫星“张衡一号”发射成功

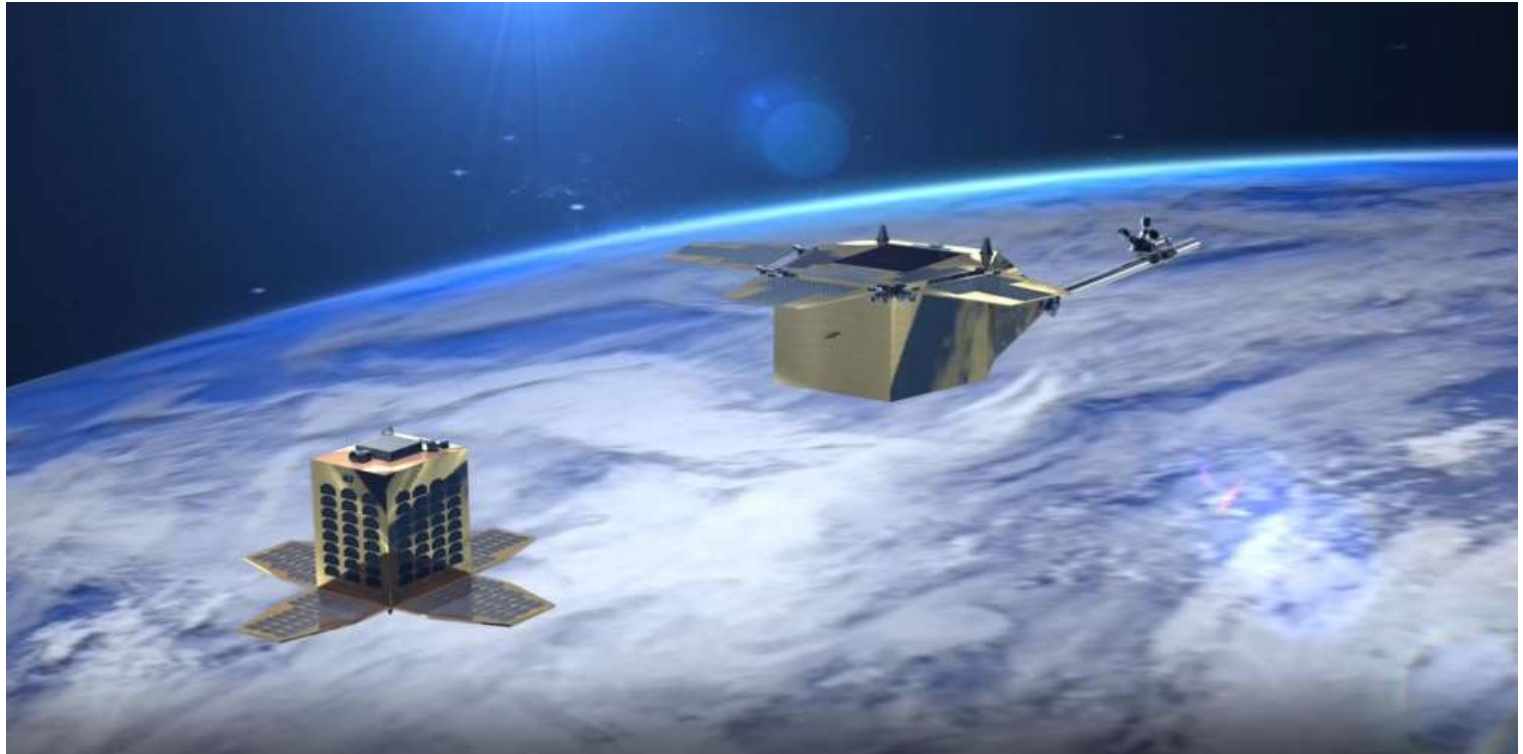
1. 人类对于地磁场的认识

CGGM 2020.0 模型结果



该模型入选国际地磁与高空物理联合会（IAGA）新一代全球地磁场模型IGRF-13，填补了我国在全球地球物理场地磁信息建模领域的空白，提升了我国在本领域国际学术地位和自主科技实力。

1. 人类对于地磁场的认识



2023年5月21，澳门与国家航天局联合研制的澳科一号卫星发射
利用低倾角轨道监测赤道附近南大西洋异常区（SAA）地磁场与空间环境的科学探测卫星

目 录

地磁部分章节

第一章 地球磁场

1. 人类对于地磁场的认识

2. 基本概念

2. 基本概念

- **磁性**：磁铁能吸引铁、钴、镍等物质的特性
- **磁性体**：具有磁性的物质
- **磁极**：磁性体中两个磁性最强的部位，指北的一极称为指北极或者正磁极，用N表示；指南的一极称为指南极或者负磁极，用S表示。
- **磁荷**：正磁荷——集中在磁体的N极（+）
负磁荷——集中在磁体的S极（-）
- **磁力**：连个磁体的磁极之间的相互作用力

$$\mathbf{F} = q \left(\frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^2} \right) = q\mathbf{E}$$

Electric field \mathbf{E}

$$\mathbf{F} = m \left(-GM \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^2} \right) = m\mathbf{g}$$

Gravitational field \mathbf{g}

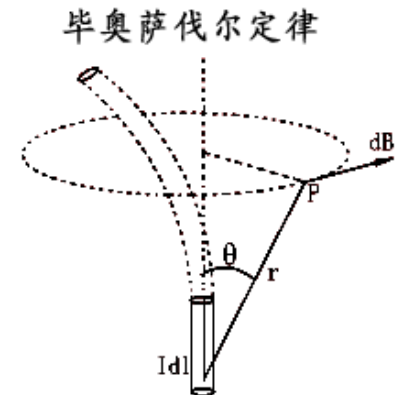
2. 基本概念

- **磁感应强度 B** ：根据毕奥萨伐尔定律：恒定电流为 I 的无限长直导线周围，距离为 a 的各点上该电流产生的磁场。

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I}{a} \qquad B = \mu H$$

- SI制单位：特斯拉（T）， $1\text{T}=1\text{Wb}/\text{m}^2$ ，通常用单位nT（纳特）， $1\text{nT}=10^{-9}\text{T}$
- 在CGSM单位制中，用 γ （伽马）为磁场强度单位，两者关系：

$$1 \gamma = 1\text{nT}$$

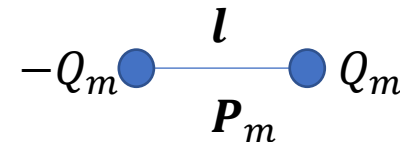


2. 基本概念

- **磁化**：在外磁场作用下，没有磁性的物体获得磁性，称为磁化
- **磁偶极子**

相距很近的两个等量异性磁极，作为一个整体称为磁偶极子。

$$\mathbf{P}_m = Q_m \cdot \mathbf{l}$$



\mathbf{P}_m 称为磁偶极矩，方向由负磁极指向正磁极

- **磁化的本质**

在外磁场作用下，物体中原子磁矩 (\mathbf{m}) 趋外磁场方向定向排列的结果。

2. 基本概念

- 磁化强度 M : 单位体积的总磁矩

$$M = \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} m$$

- 磁极化强度 J : 单位体积的总磁偶极矩

$$J = \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} P_m$$

- 在SI单位制中

$$J = \mu_0 M \quad P_m = \mu_0 m$$

目 录

地磁部分章节

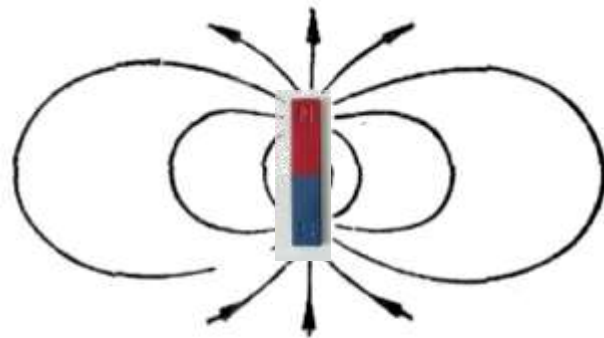
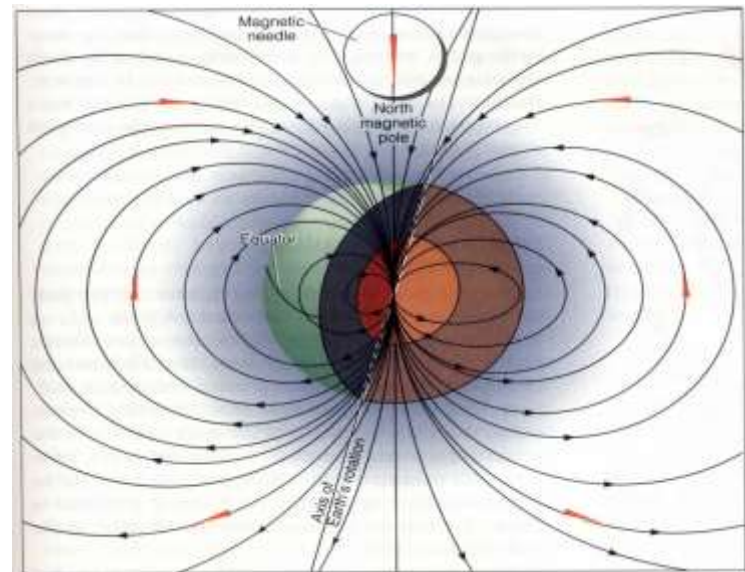
第一章 地球磁场

1. 人类对于地磁场的认识
2. 基本概念
3. 地球磁场

3. 地球磁场

地磁场：地球周围存在的磁场。

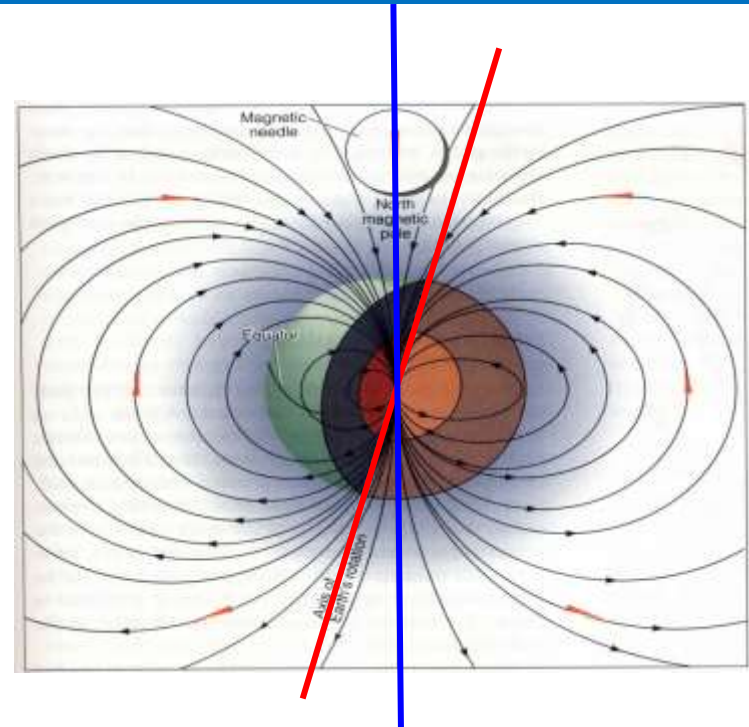
- 宏观上看，地球磁场与位于球心的**磁偶极子**磁场相似。



偶极子

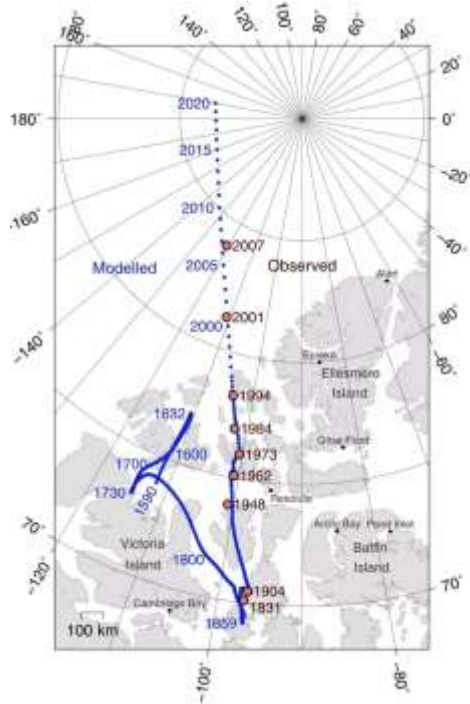
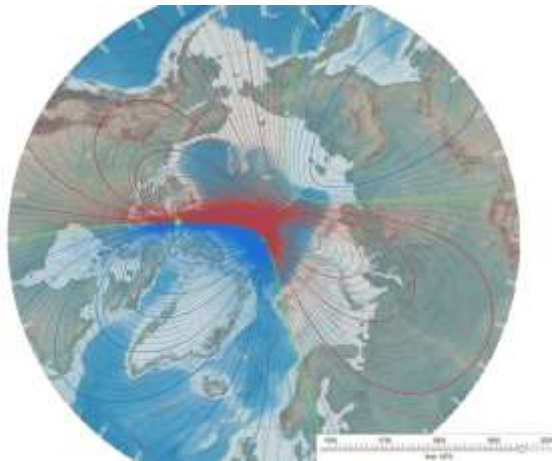
3. 地球磁场

地磁场：地球周围存在的磁场。



- 地磁场有两个磁极，其S极位于地理北极附近，N极位于地理南极附近，但不重合，磁轴（蓝线）与地球自转轴（红线）的夹角现在约为 11.5° 。

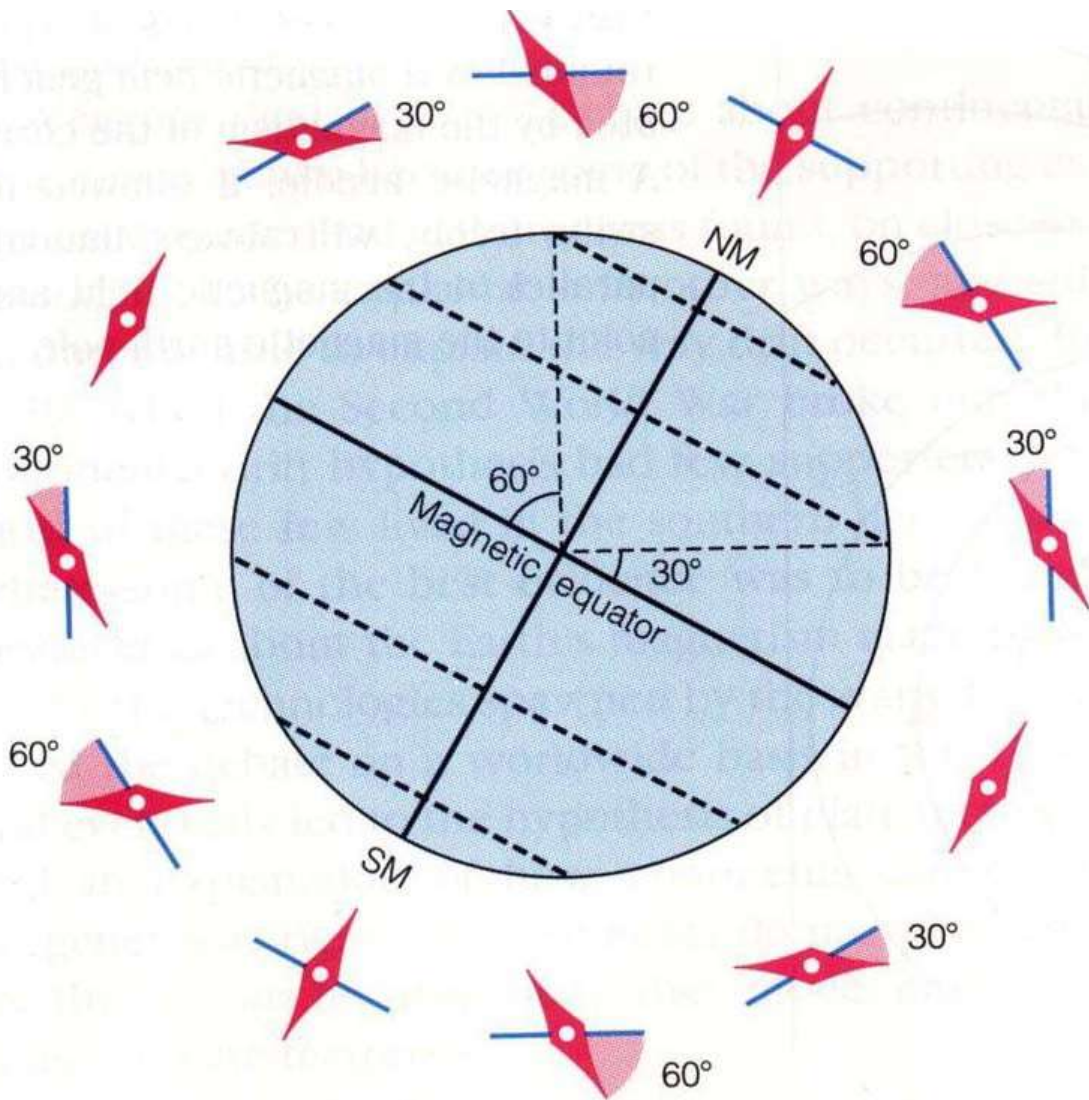
3. 地球磁场



- 长期观测证实，地磁极围绕地理极附近进行着缓慢的迁移。
- 北磁极在1830年代之前一直在加拿大附近来回“游荡”
- 从 1831 年开始，北磁极开始往西伯利亚方向移动
- 到1990年代中期，磁极移动速度加快，从原来的每年约15公里上升到了每年55公里
- 2001年地磁点进入了北冰洋
- 在过去150年间地磁场强度衰减了10%至15%，并且减弱的速率有可能继续加快

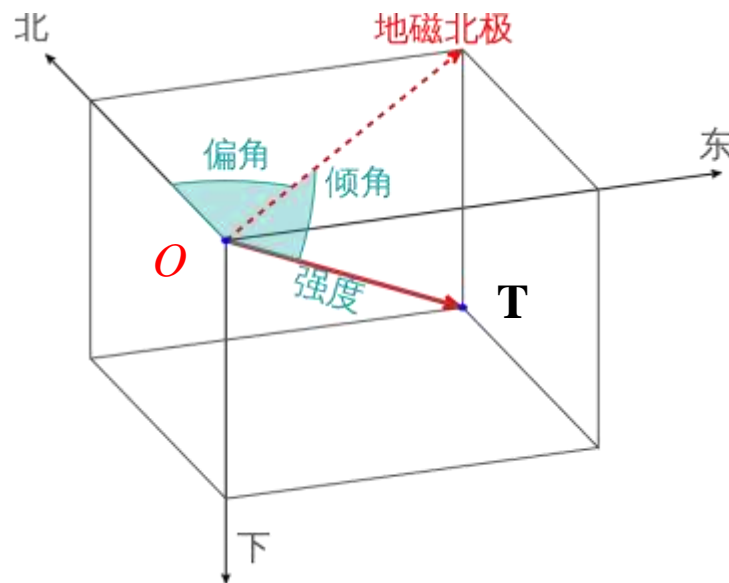
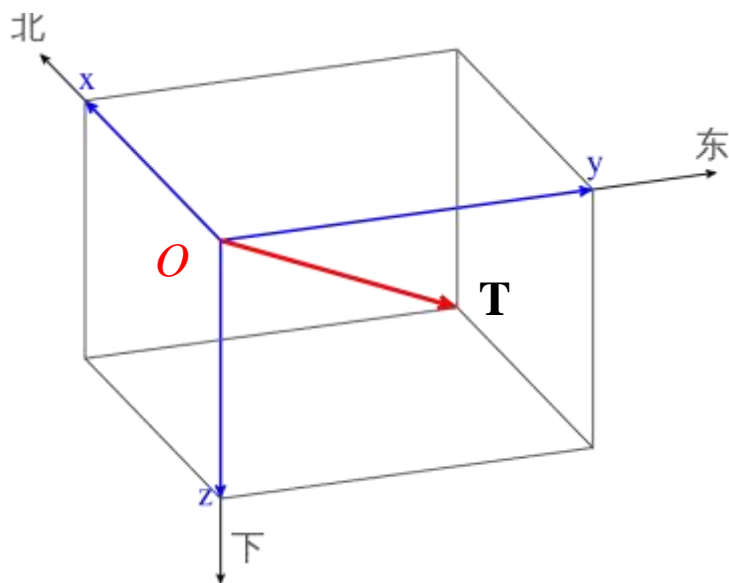
3. 地球磁场

- 在任意点，地磁场有大小和方向，它们都是可测量的。
- 描述地磁场大小和方向的物理量，称作地磁要素



3. 地球磁场

■ 地磁七要素

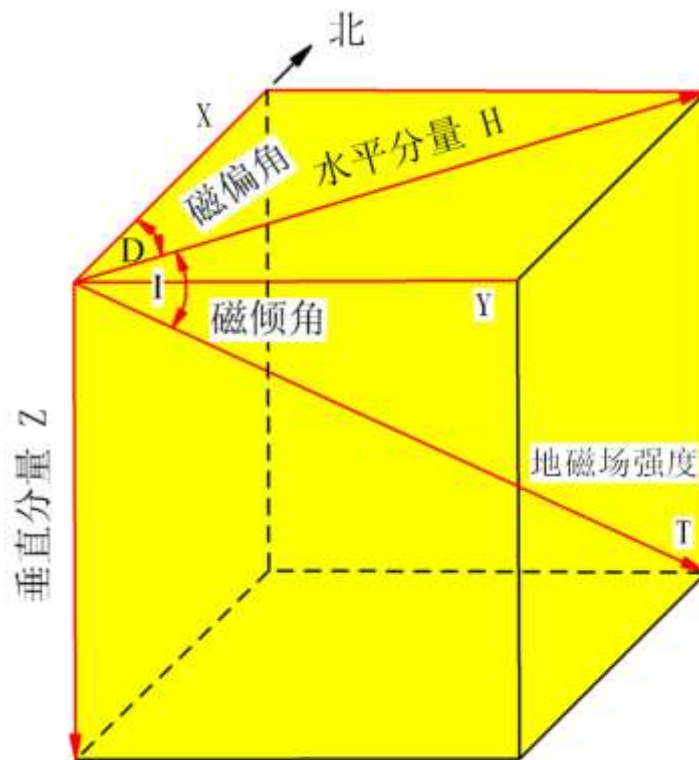


空间一点 O 的地磁场磁感应强度 T 。以**测点 O 为原点**，建立直角坐标系。 Z 轴为过 O 点的铅垂线，规定正方向向下，指向地心。 XOY 平面为水平面， X 轴沿地理子午圈的切线，正方向指向地理北， Y 轴沿地理纬度圈的切线，正方向指向东。

3. 地球磁场

■ 地磁七要素

- 磁偏角 D (Declination)
- 磁倾角 I (Inclination)
- 总磁场强度 T
- 垂直磁场强度 Z
- 水平磁场强度 H
- 水平 X 分量 (北向)
- 水平 Y 分量 (东向)



地球的磁场强度矢量及地磁要素

注意：这里说的磁场强度其实是磁感应强度

magnetic field intensity

magnetic flux density

3. 地球磁场

■ 地磁七要素

北向分量 X 、东向分量 Y 和垂直分量 Z

地磁场强度 T 在 X 、 Y 、 Z 轴上的分量，各分量与相应坐标轴的**正向一致时为正，反之为负**。

水平分量

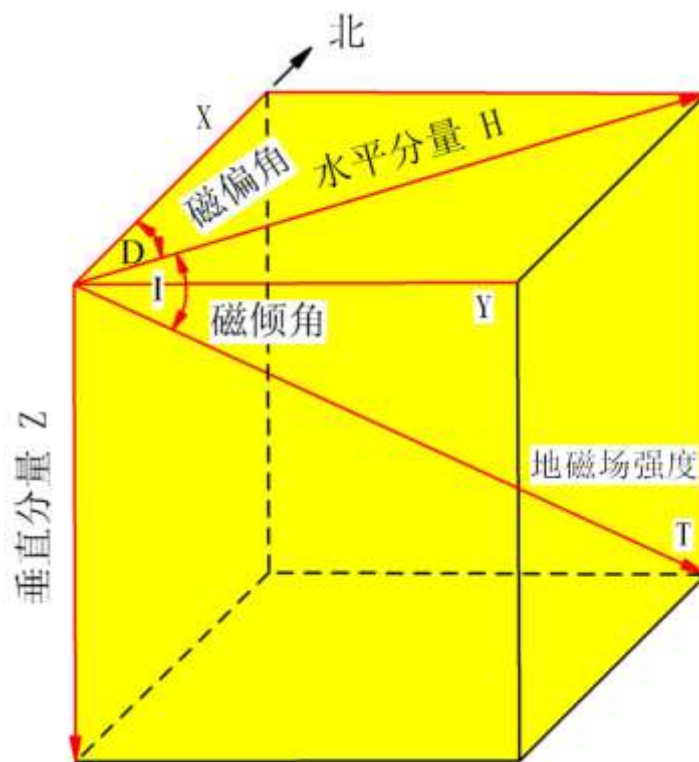
T 在 XOY 平面上的分量 H 。 **H 指向磁北，其延长线即是磁子午线。**

磁偏角

磁子午线(磁北)与地理子午线(地理北)的夹角，以 D 表示。 **H 偏东时 D 为正，反之为负。**

磁倾角

T 与 XOY 平面的夹角，以 I 表示。 **T 下倾时 I 为正，反之为负。**

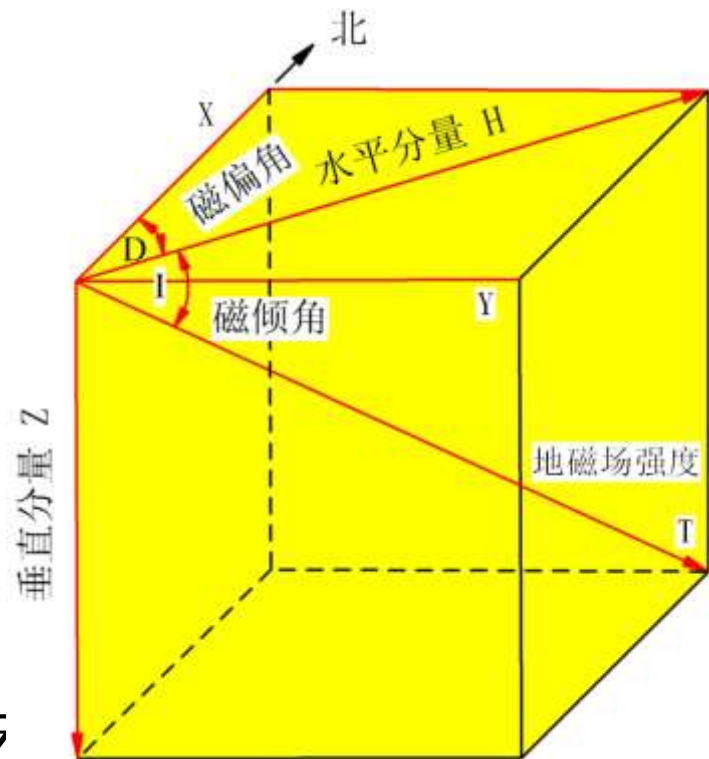


地球的磁场强度矢量及地磁要素

3. 地球磁场

■ 地磁七要素

- $H = T \cos I$
- $Z = T \sin I$
- $X = H \cos D$
- $Y = H \sin D$
- $\tan I = Z/H$
- $\tan D = Y/X$
- $T = \sqrt{H^2 + Z^2} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$
- $\mathbf{T} = X\mathbf{i} + Y\mathbf{j} + Z\mathbf{k}$



地球的磁场强度矢量及地磁要素

3. 地球磁场

■ 地磁独立三要素

地磁场七个要素中，由其中三个要素可以计算出其余四个要素，这三个要素称为“地磁场独立三要素”。

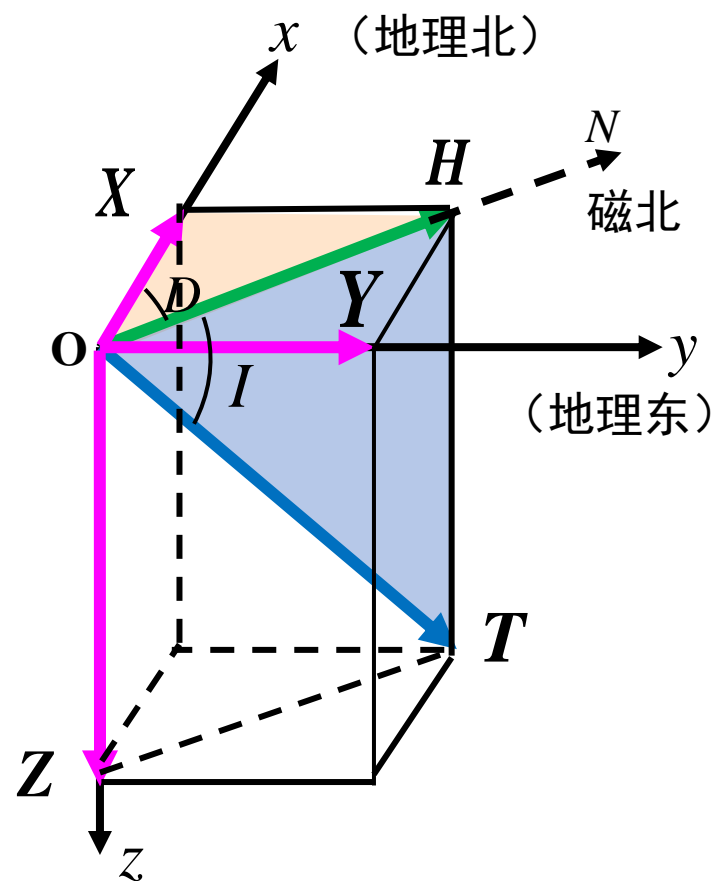
$$X=H\cos D, \quad Y=H\sin D, \quad Z=T\sin I$$

$$\tan D=Y/X, \quad H=T\cos I, \quad \tan I=Z/H$$

$$H^2=X^2+Y^2 \quad T^2=X^2+Y^2+Z^2$$

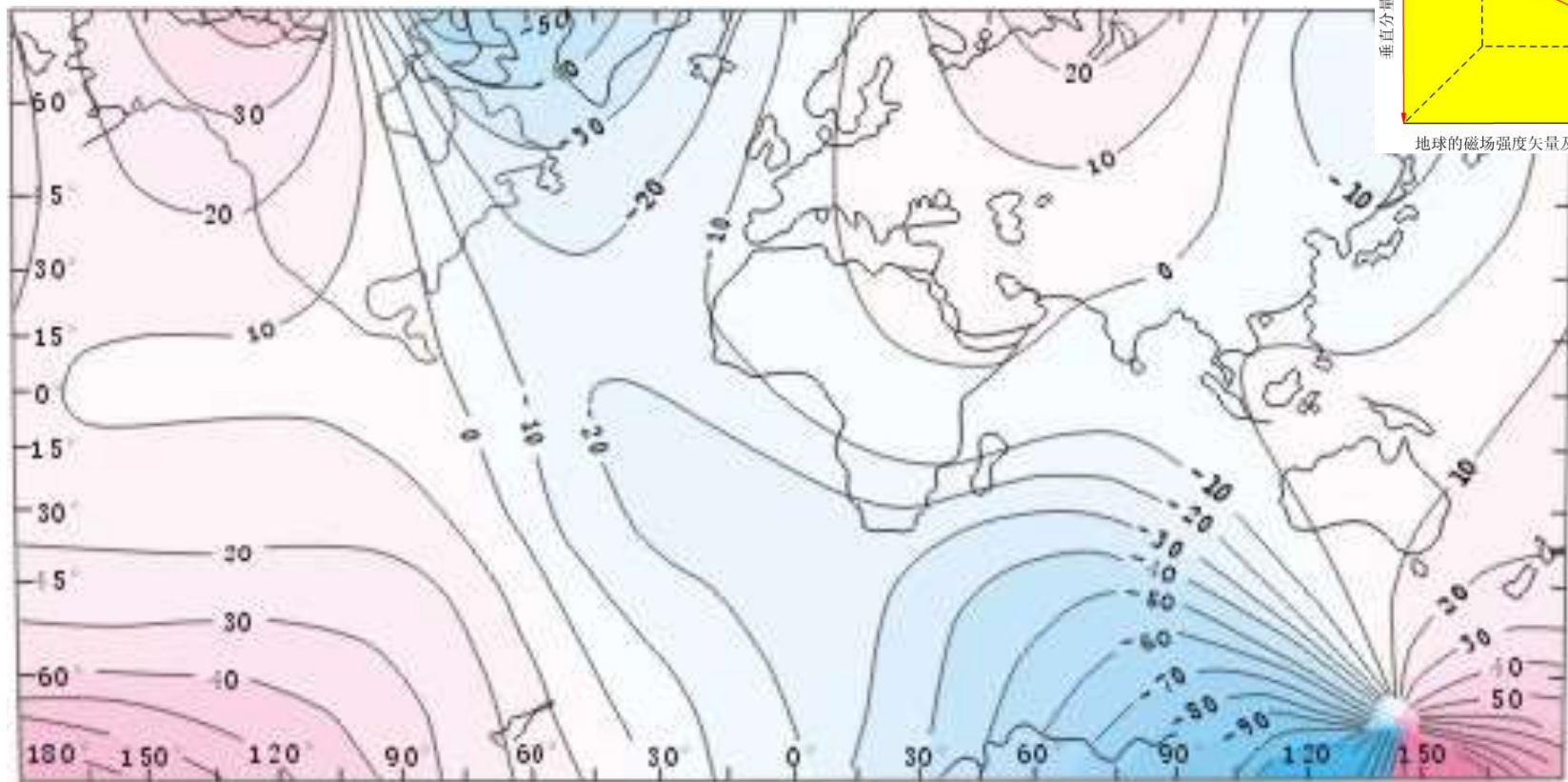
地磁独立三要素：

HDZ 、 HDI 、 TDI 、 XYZ 注意：不是任意三要素都是独立的



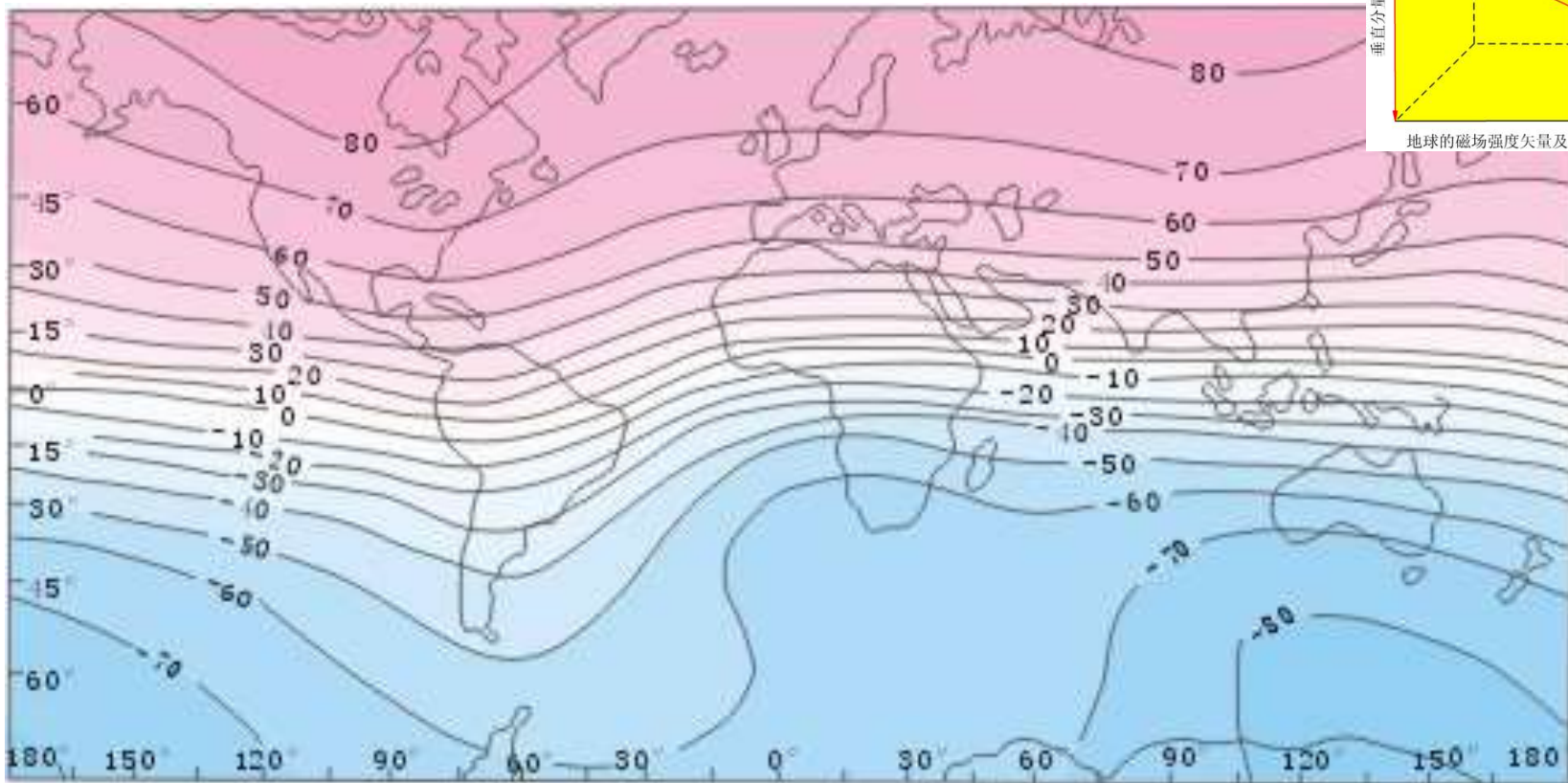
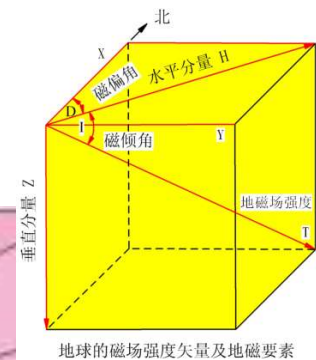
3. 地球磁场

- 地磁场是空间和时间的函数，需要实际测量
- 实际测量方式：
 - ✓ 固定点上连续测量，即地磁台；
 - ✓ 野外测点间断测量，即移动台站；
- 地磁要素随时间变化，将不同时刻观测数据归算到某一特定日期（1月1日0时0分），称作**通化**。
- 地磁要素等值线图即为**地磁图**。



1980年代世界地磁场**等偏线**等值线平面图（单位°）

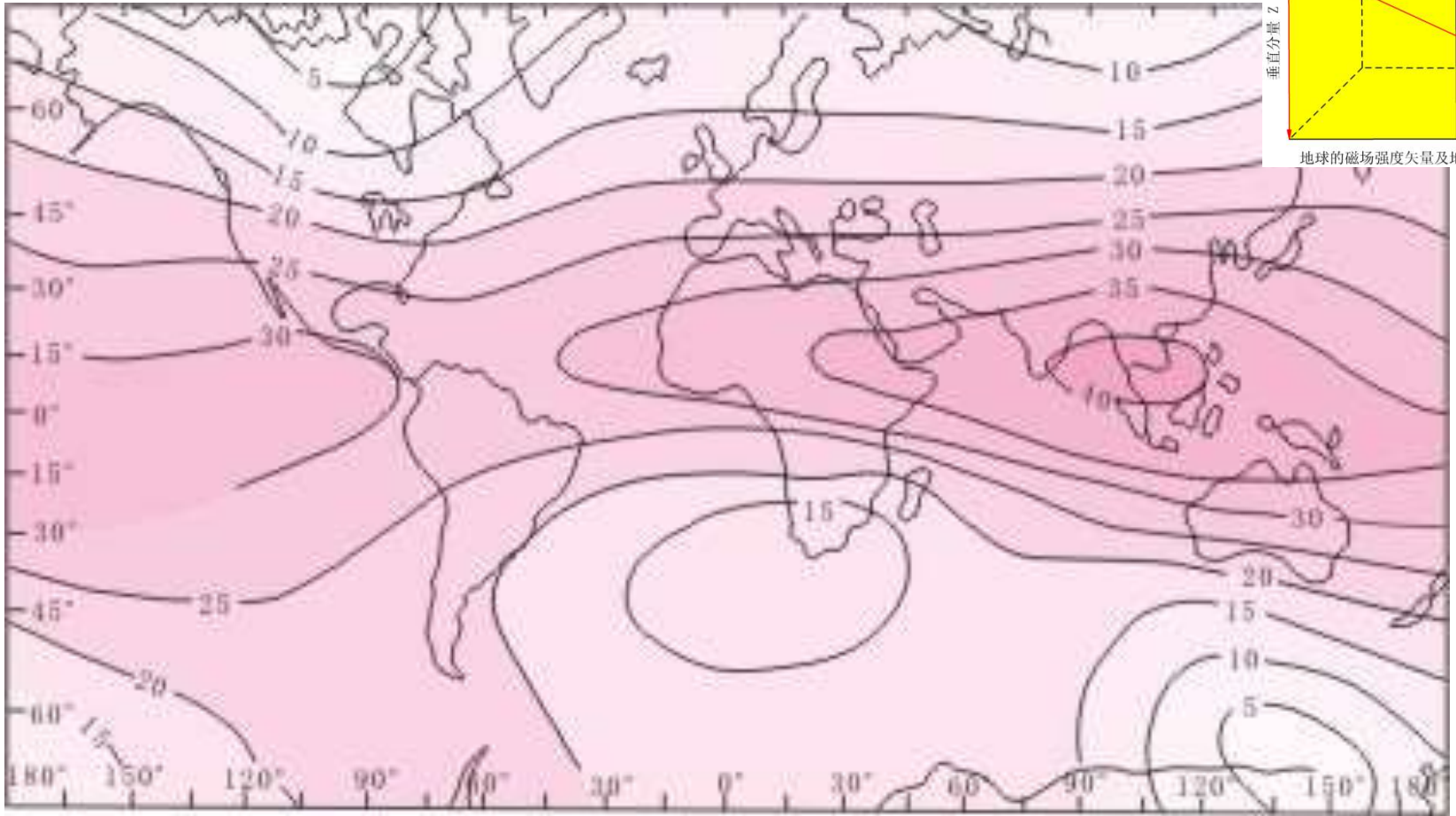
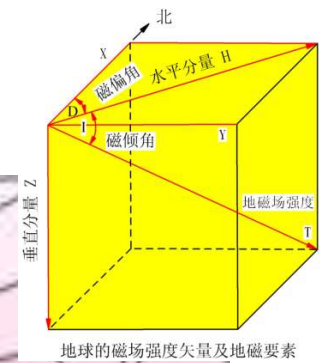
- 等偏线从一点出发汇聚于另一点的曲线簇，明显地汇聚于南北两磁极区，两条零偏线将全球分为正负两个部分



1980年代世界地磁场**等倾线**等值线平面图（单位°）

- 等倾线和纬度线大致平行，零倾线在地理赤道附近，称为磁赤道，但不是一条直线；磁赤道向北倾角为正，向南为负

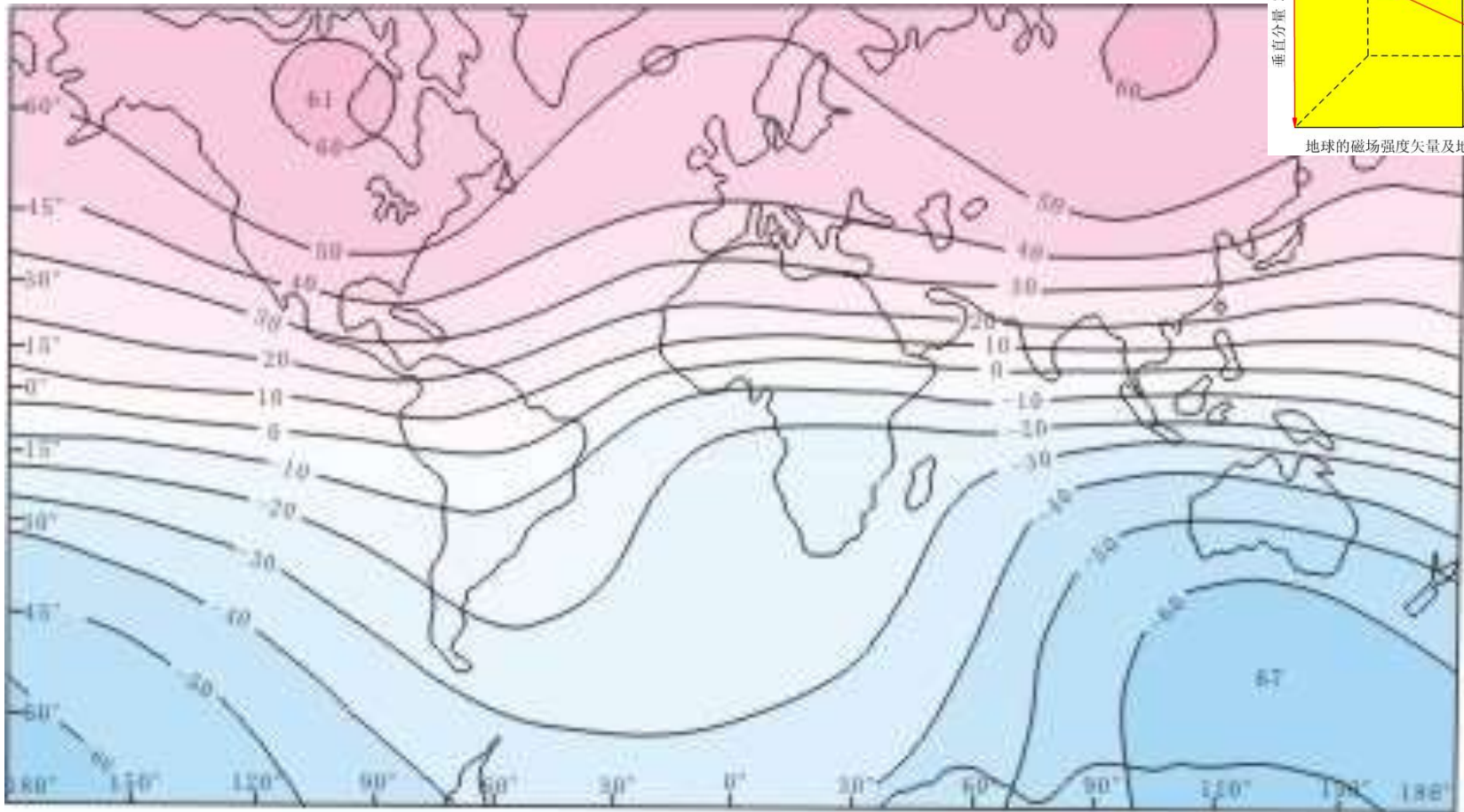
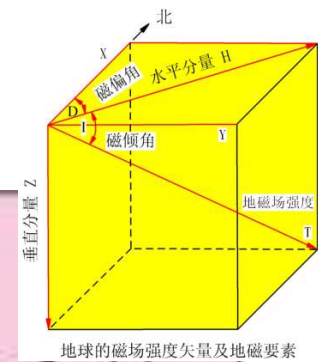
$$H = T \cos I$$



1980年代世界地磁场**水平分量**等值线平面图（单位 10^3nT ）

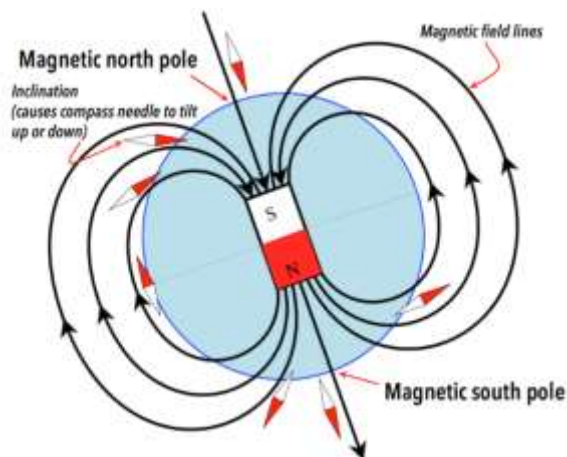
- 水平强度H等值线大致是沿纬度线排列的曲线簇，在磁赤道附近最大，随着纬度向两极增高，H值逐渐减小趋于零。

$$Z = T \sin I$$



1980年代世界地磁场**垂直分量**等值线平面图（单位 10^3nT ）

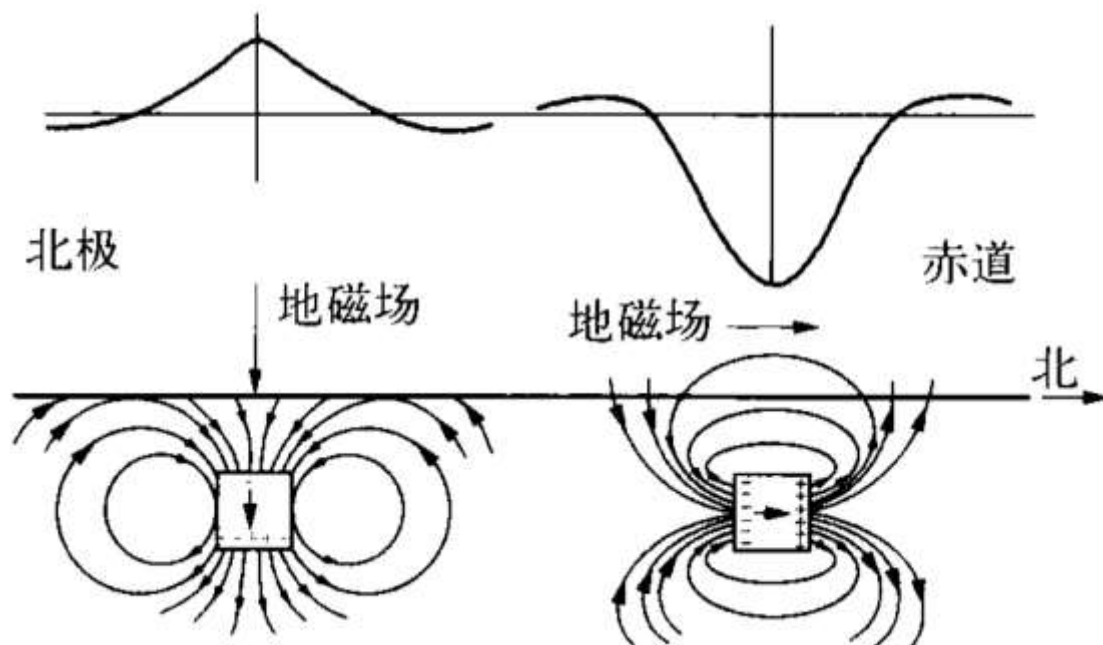
- 垂直强度Z大致与等倾线分布相似，近乎与纬度线平行，在磁赤道上 $Z=0$ ，由此向两极其绝对值逐渐增大，在磁赤道以北 $Z>0$ ，表示垂直分量向下，在磁赤道以南 $Z<0$ ，表示垂直分量向上。



感应磁化的
纬度效应

$$H = T \cos I$$

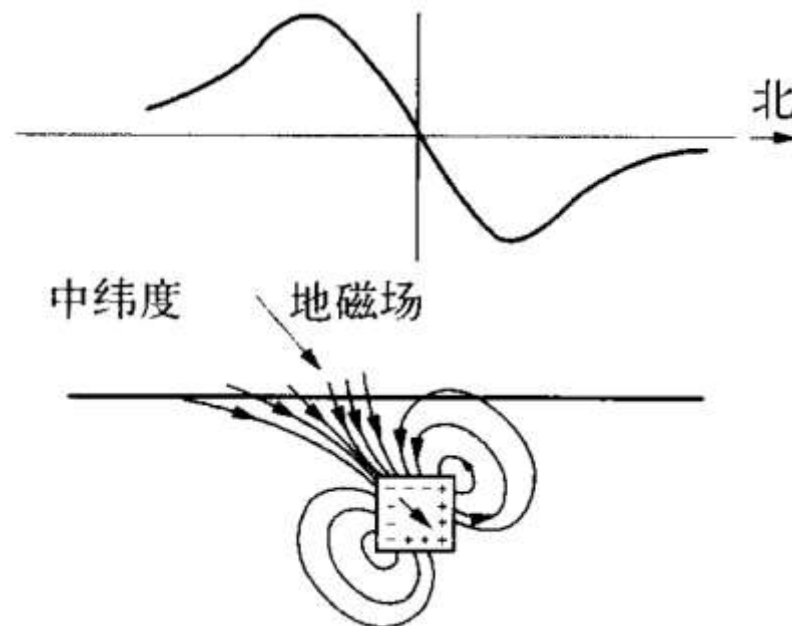
$$Z = T \sin I$$

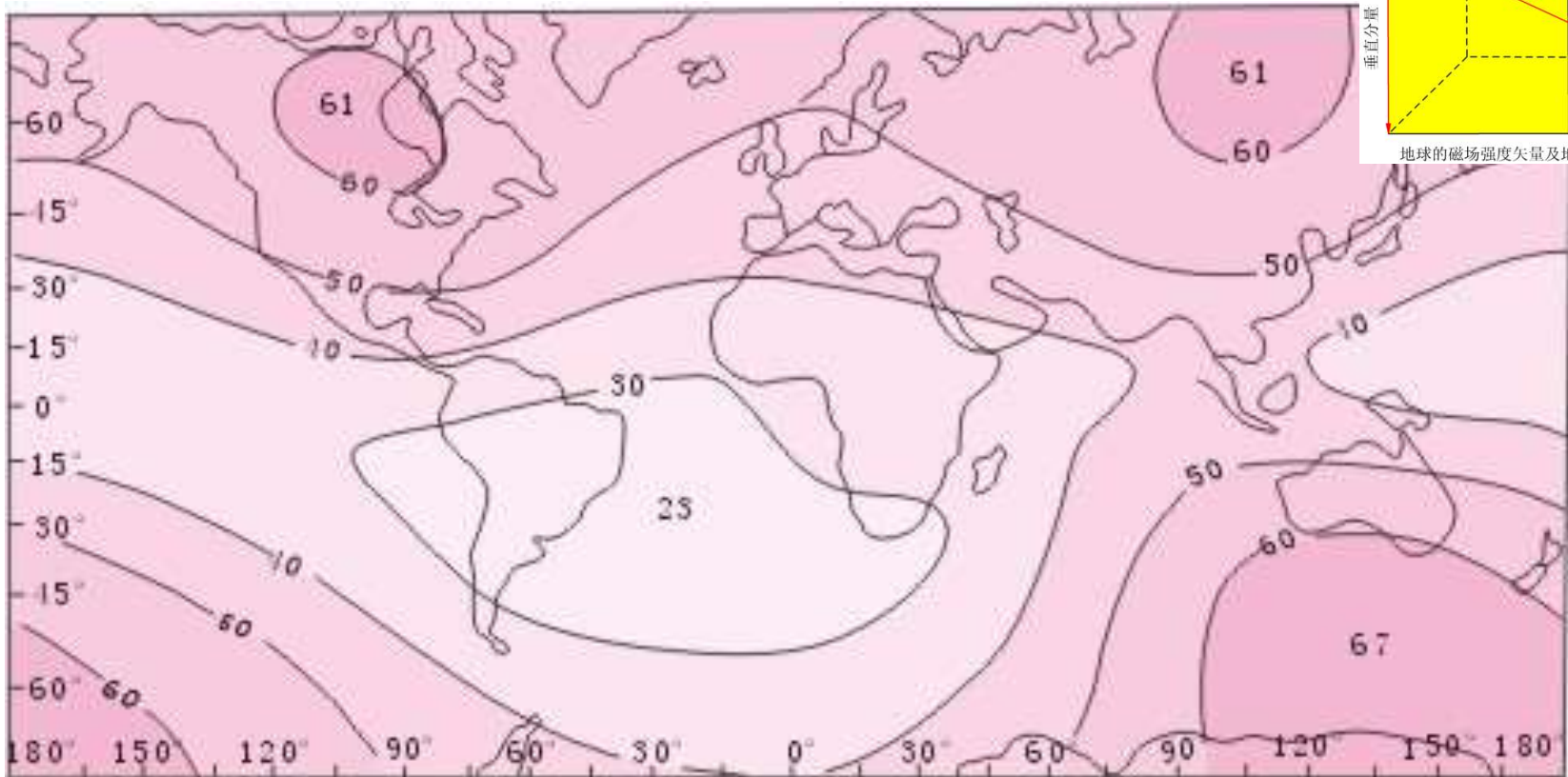
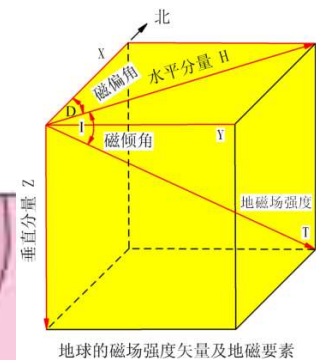


在极区：磁体被垂直磁化，磁异常在Z分量上表现最明显；

在地球赤道：磁体被水平磁化，磁异常在H分量上表现最明显；

在中纬度地区：磁化情况介于两者之间。





1980.0年代世界地磁场**总场强度**等值线平面图（单位 10^3nT ）

- 地磁总强度等值线与纬度线近乎平行，其强度值在磁赤道附近约为 **$30000-40000\text{ nT}$** ，向两极增大，在两极约是 **$60000-70000\text{ nT}$** 。

分量 场 值 地名	$\frac{H}{10^5 nT}$	$\frac{Z}{10^5 nT}$	I	D	分量 场 值 地名	$\frac{H}{10^5 nT}$	$\frac{Z}{10^5 nT}$	I	D
北京	0.2962	0.4618	57°19'	-5°59'	广州	0.3809	0.2369	31°51'	-1°25'
石家庄	0.3028	0.4375	55°18'	-4°48'	南宁	0.3390	0.2323	31°08'	-1°03'
太原	0.3044	0.4390	55°16'	-4°14'	哈尔滨	0.2556	0.4865	62°18'	-9°55'
呼和浩特	0.2851	0.4751	59°01'	-4°28'	长春	0.2659	0.4721	60°36'	-8°58'
西安	0.3281	0.3993	50°37'	-2°34'	沈阳	0.2798	0.4552	58°25'	-7°49'
兰州	0.3161	0.4246	53°20'	-1°46'	济南	0.3122	0.4165	53°12'	-5°10'
西宁	0.3122	0.4312	54°08'	-1°21'	合肥	0.3388	0.3565	46°48'	-4°02'
乌鲁木齐	0.2540	0.5617	63°06'	2°37'	上海	0.3389	0.3420	45°31'	-4°40'
银川	0.3000	0.4510	56°20'	-2°36'	南京	0.3390	0.3608	46°48'	-4°12'
成都	0.3500	0.3525	45°13'	-1°20'	南昌	0.3552	0.3152	41°33'	-3°02'
昆明	0.3795	0.2675	35°13'	-1°00'	杭州	0.3445	0.3290	43°55'	-4°09'
贵阳	0.3710	0.2925	38°10'	-1°25'	福州	0.3640	0.2743	36°57'	-2°50'
拉萨	0.3560	0.3378	43°32'	-0°14'	漠河	0.1995	0.5700	70°14'	-10°57'
郑州	0.3232	0.3996	50°58'	-3°54'	台北	0.3642	0.2576	35°17'	-2°41'
武汉	0.3474	0.3436	44°41'	-3°07'	曾母暗沙	0.4020	-0.1100	-15°10'	0°25'
长沙	0.3603	0.3125	40°57'	-2°26'	香港	0.3827	0.2266	30°37'	-2°33'

我国各地的地磁要素

3. 地球磁场

■ 地磁场的组成

- 地磁场 = 基本磁场 + 变化磁场 + 磁异常
- 基本磁场：中心偶极子磁场和大陆磁场组成，来源地球内部，占地磁场主要部分(95%以上)。

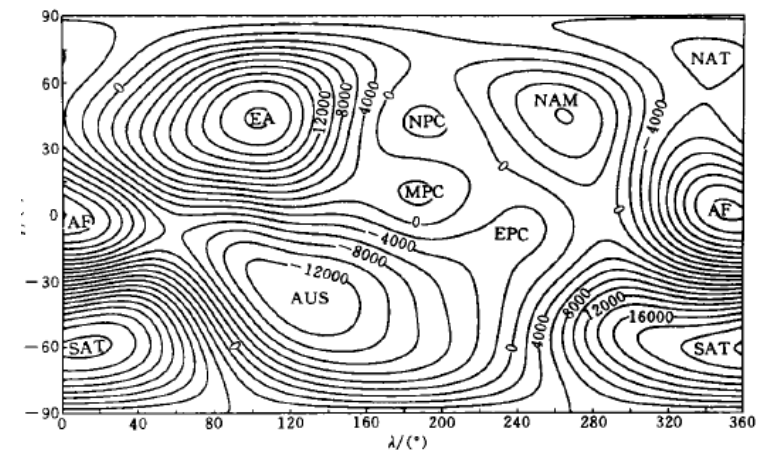
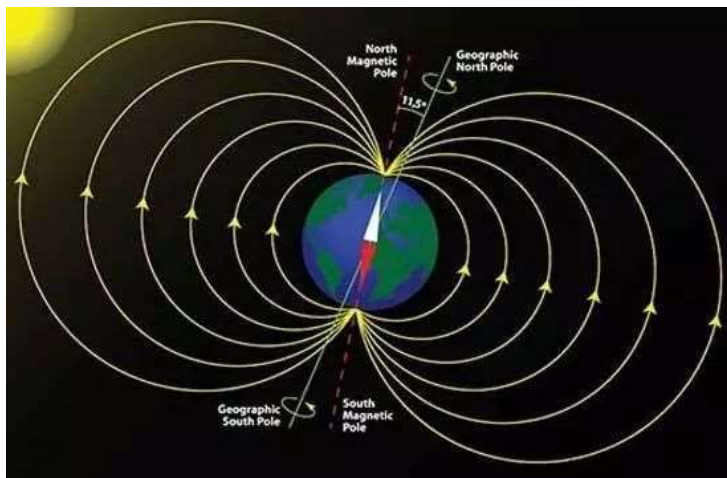


图1 1995.0年非偶极子磁场垂直强度(Z)分布图 单位:nT

3. 地球磁场

■ 地磁场的组成

- 地磁场 = 基本磁场 + 变化磁场 + 磁异常
- 变化磁场：主要指短期变化磁场，来源地球外部，占地磁场1%以下。

平静变化：连续出现，比较有规律且有一定周期的变化，来源于电离层内长期存在的电流体系的周期性改变。

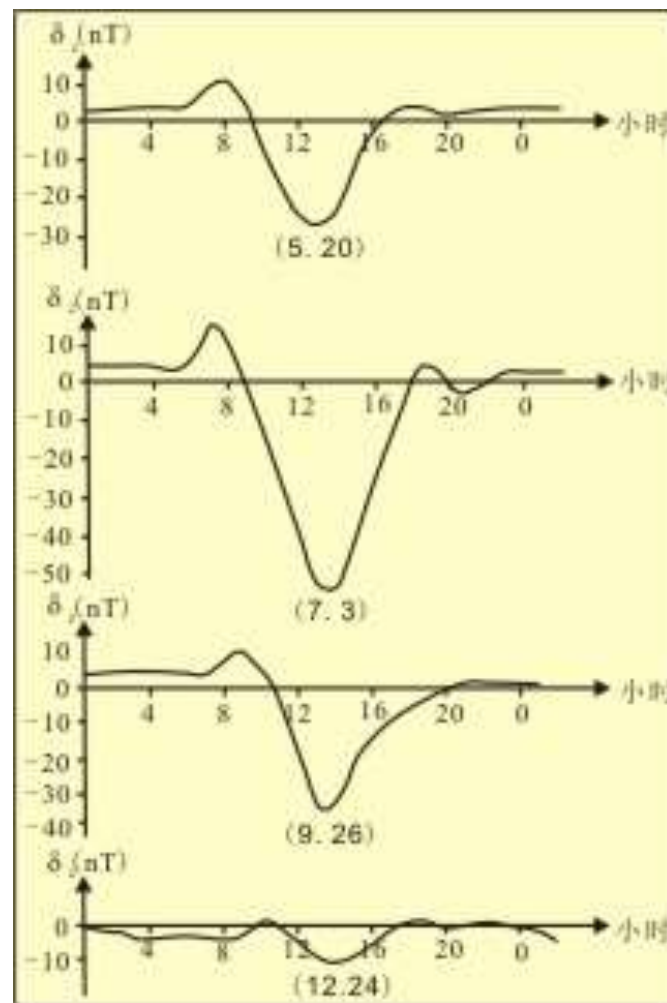
包括太阳静日变化和太阴日变化。

• 太阳静日变化

- ✓ 以一个**太阳日**为周期
- ✓ 白天比夜晚变化幅度大
- ✓ 夏季比冬季变化幅度大
- ✓ 平均变化幅度为数nT至数十nT
- ✓ 按一定规律随纬度分布
- ✓ 在同一纬度圈的不同地点，静日变化曲线形态相同，且极值也出现在相同的地方时上

• 太阴日变化

- ✓ 依赖于地方太阴日（太阴日是地球相对于月球自转一周的时间，约25小时）
- ✓ 以半个太阴日为周期
- ✓ 太阴日变化幅度很微弱（Z和H的最大振幅仅1-2nT）
- ✓ 磁测时已将它包括在太阳静日变化内，故不再单独考虑



南方某城市不同季节的Z日变曲线

3. 地球磁场

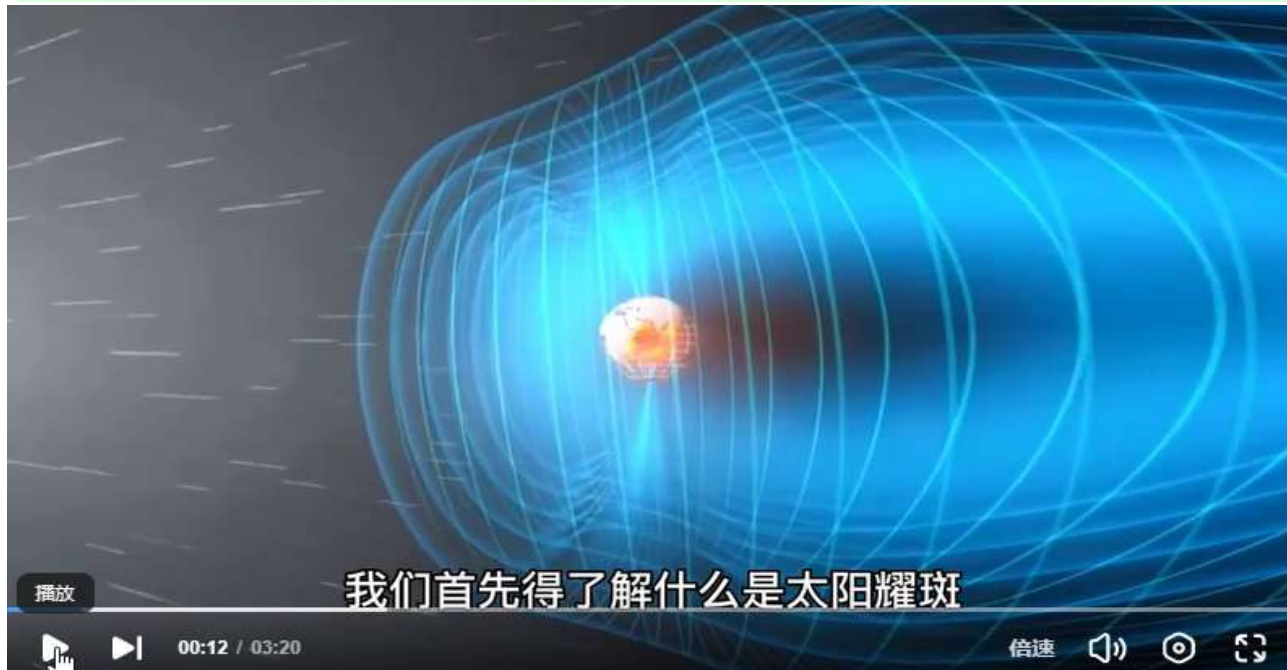
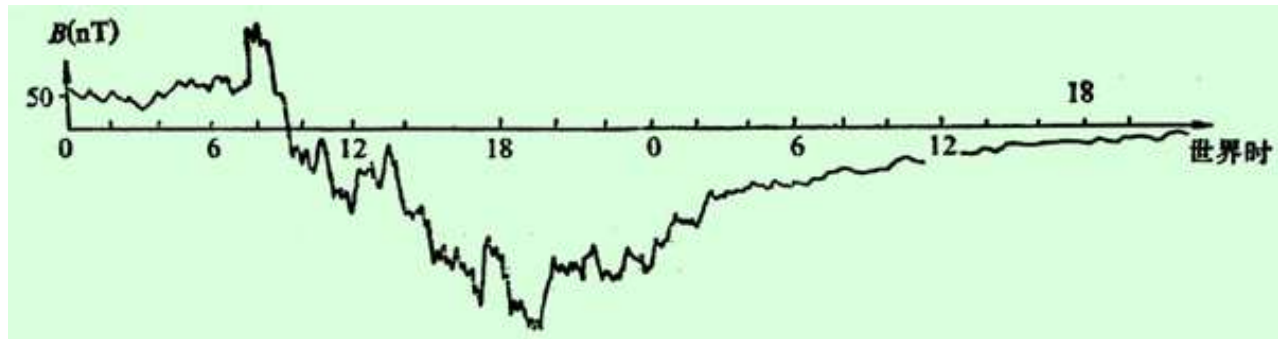
■ 地磁场的组成

- 地磁场 = 基本磁场 + 变化磁场 + 磁异常
- 变化磁场：主要指短期变化磁场，来源地球外部，占地磁场1%以下。

扰动变化：偶然发生的、短暂而复杂的变化，由磁层结构、电离层中电流体系及太阳辐射等的变化引起。包括磁暴和地磁脉动。

- 地磁场常发生不规则的突然变化，叫磁扰，强度大的磁扰称为磁暴。磁暴是一种全球性效应。磁暴发生时，地磁场水平分量强度突然增加，垂直分量强度相对变化较小。磁暴可持续数天，幅度达数百至上千nT。
- 地磁脉动是一种短周期的地磁扰动，周期一般为(0.2-100)秒，振幅为0.01-10nT。

1959年7月14日中国佘山地磁台的磁暴曲线



[\[新闻直播间\]第25太阳活动周出现迄今最强地磁暴 \(cctv.cn\)](http://cctv.cn)

短期变化磁场

平静变化

太阳静日变化

白天比夜晚变化幅度大，
夏季比冬季变化幅度大，
平均变化幅度为数纳特
至数十nT。

太阴日变化

太阴日变化幅度很微弱

扰动变化

磁扰(磁暴)

可持续数天，幅度达数
百至上千nT。

地磁脉动

周期短，一般为 $(0.2 \sim 100) \text{ s}$ (秒)，振幅小，
一般为 $(0.01 \sim 10) \text{ nT}$ 。

3. 地球磁场

■ 地磁场的组成

- 地磁场 = 基本磁场 + 变化磁场 + 磁异常
- 磁异常：主要指地壳中具有磁性的岩石、矿体或地质构造所引起的磁场，它叠加在基本磁场之上。

测量地磁场中，研究对象所产生的磁场称作磁异常，其他部分称作正常场，或称背景场，也称基准场。
正常场和异常场是相对的概念

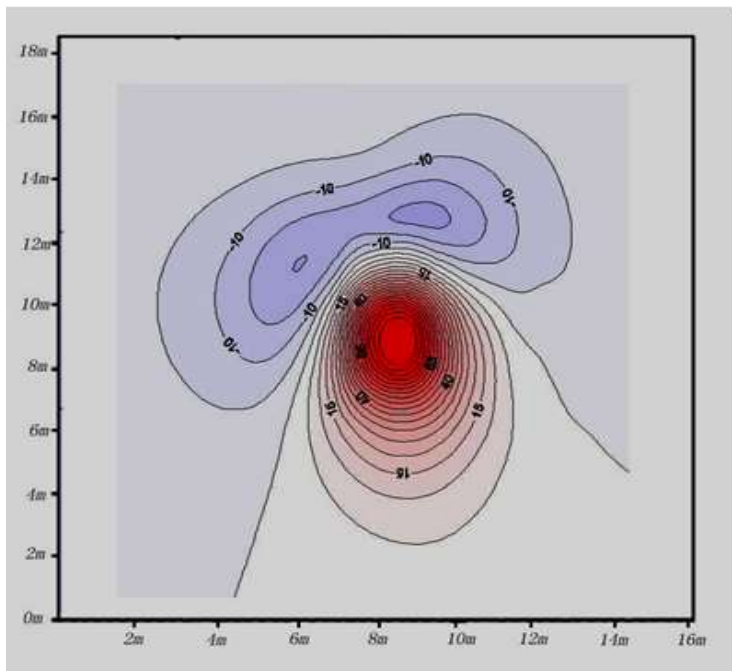
磁异场

□ 磁异常是地下岩、矿体或地质构造受到地磁场磁化以后，在其周围空间形成、并叠加在地磁场上的次生磁场，因此它属于**内源磁场**（仅是其中很小的一部分）。

□ 磁异常中由分布范围较大的深部磁性岩层或区域地质构造等引起的部分，称为**区域异常**（regional magnetic anomaly）；由分布范围较小的浅部磁性岩、矿体或地质构造等引起的部分，称为**局部异常**（local magnetic anomaly）。

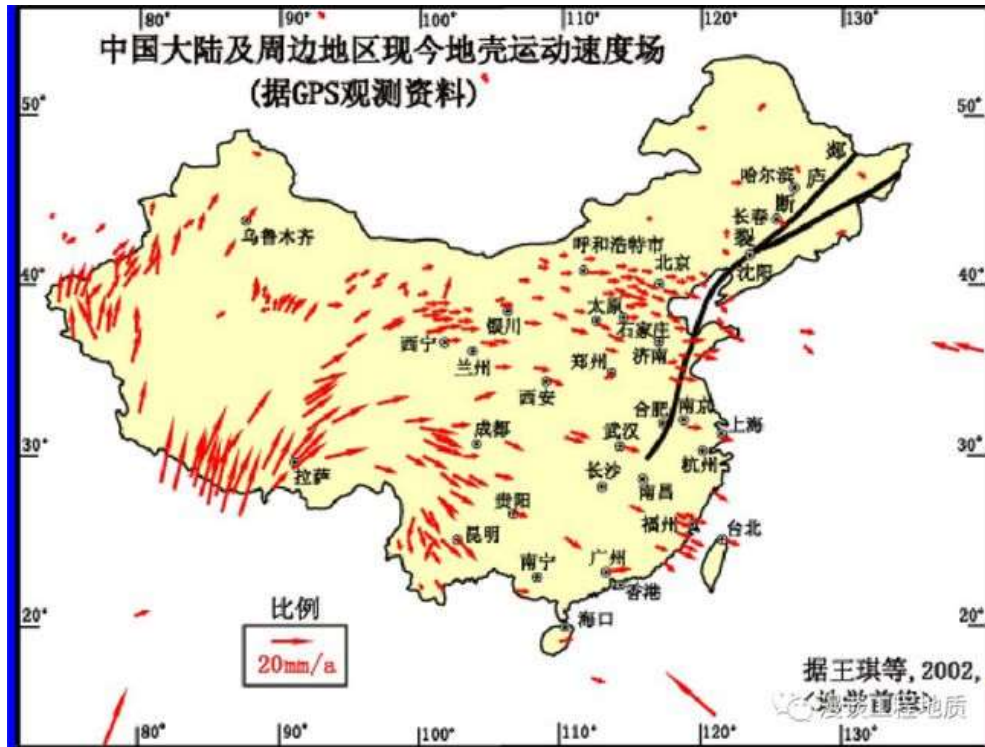
磁异常

深圳某水域滨海区
磁力探测异常图



经开挖验证发现的钢管

磁异常



1957年提出的郯城-庐江大断裂带已成为我国东部地质构造和矿床生成控制的重要因素。

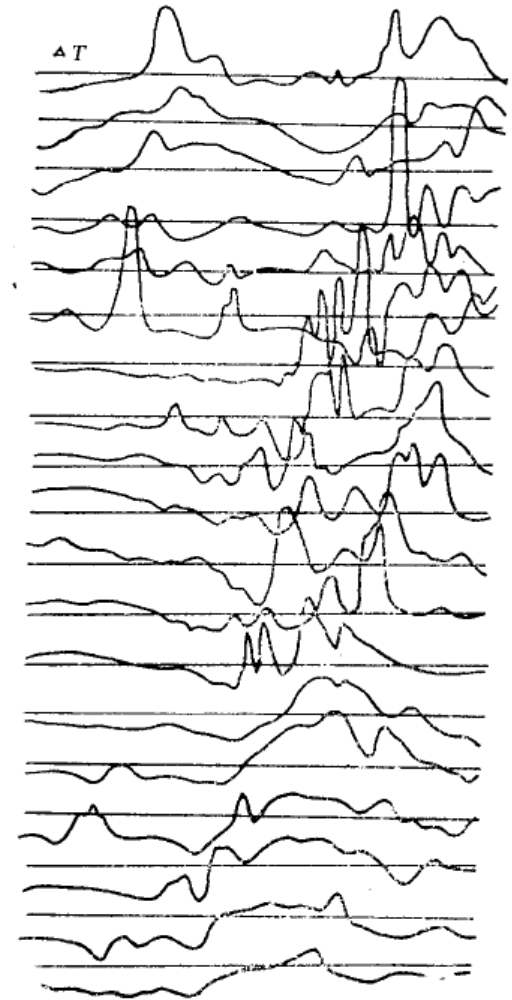


图 2.8—1 郯城—庐江深大断裂中部磁异常图

土耳其东部里氏7.2级地震

搜狐新闻
news.sohu.com

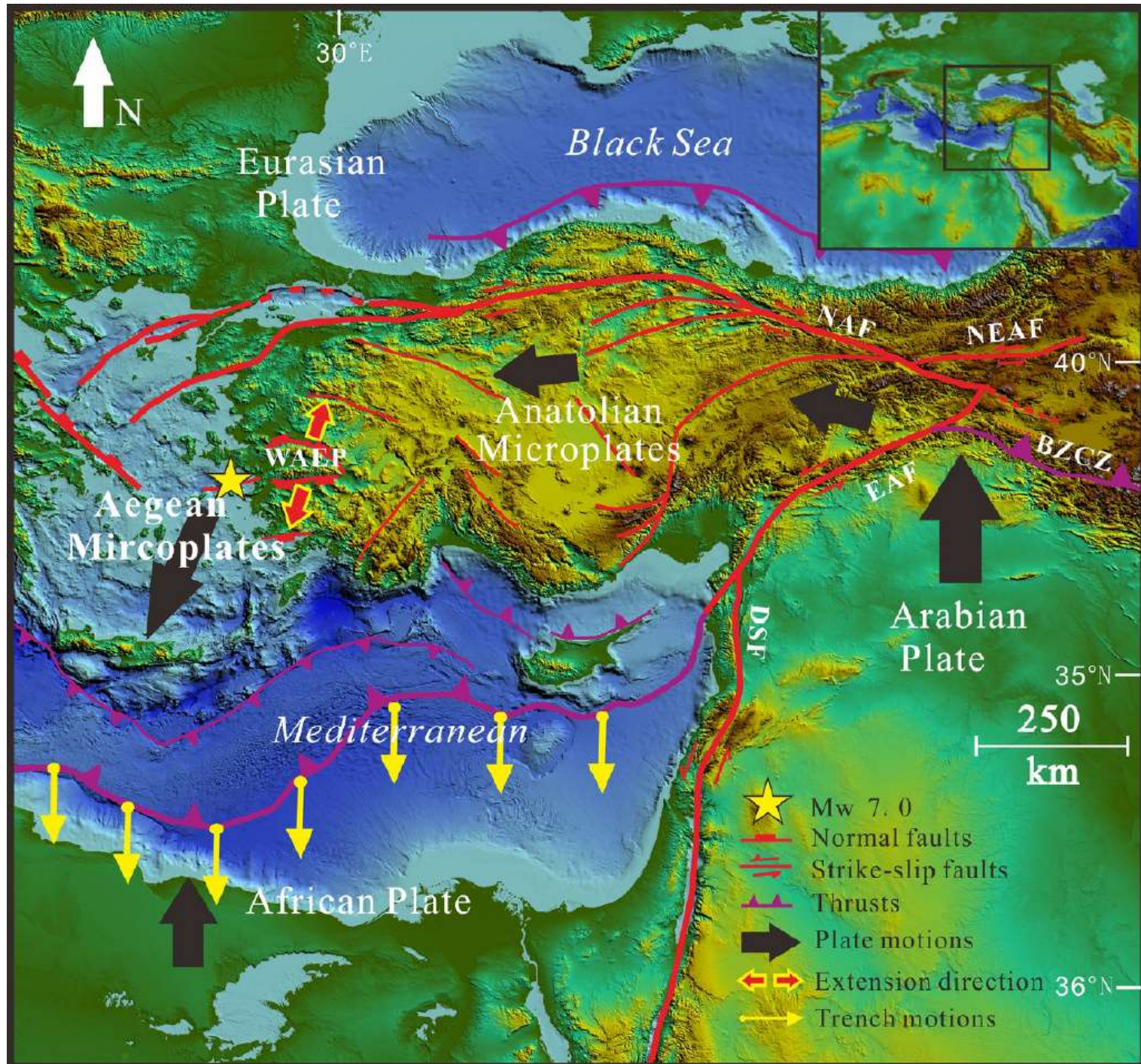
🕒 时间：10月23日10时41分 震级：7.2级

📍 震中：和伊朗接壤的凡省的塔巴利村

🏠 损失：这次地震造成6000座建筑物遭破坏，4152人受伤。村庄几乎被夷为平地。救援人员已从废墟中成功救出188人

👤 伤亡：上升至601人





磁异常

应用磁法解决问题的前提条件？

- 探测对象与围岩（或周围环境）有**磁性差异**，由这种差异引起的磁场变化，能为现代磁力仪测出来；
- 与探测对象无关的干扰因素产生的**干扰磁场**与探测对象产生的磁场相比，足够小或有明显的特征，可以被分辨或消除。

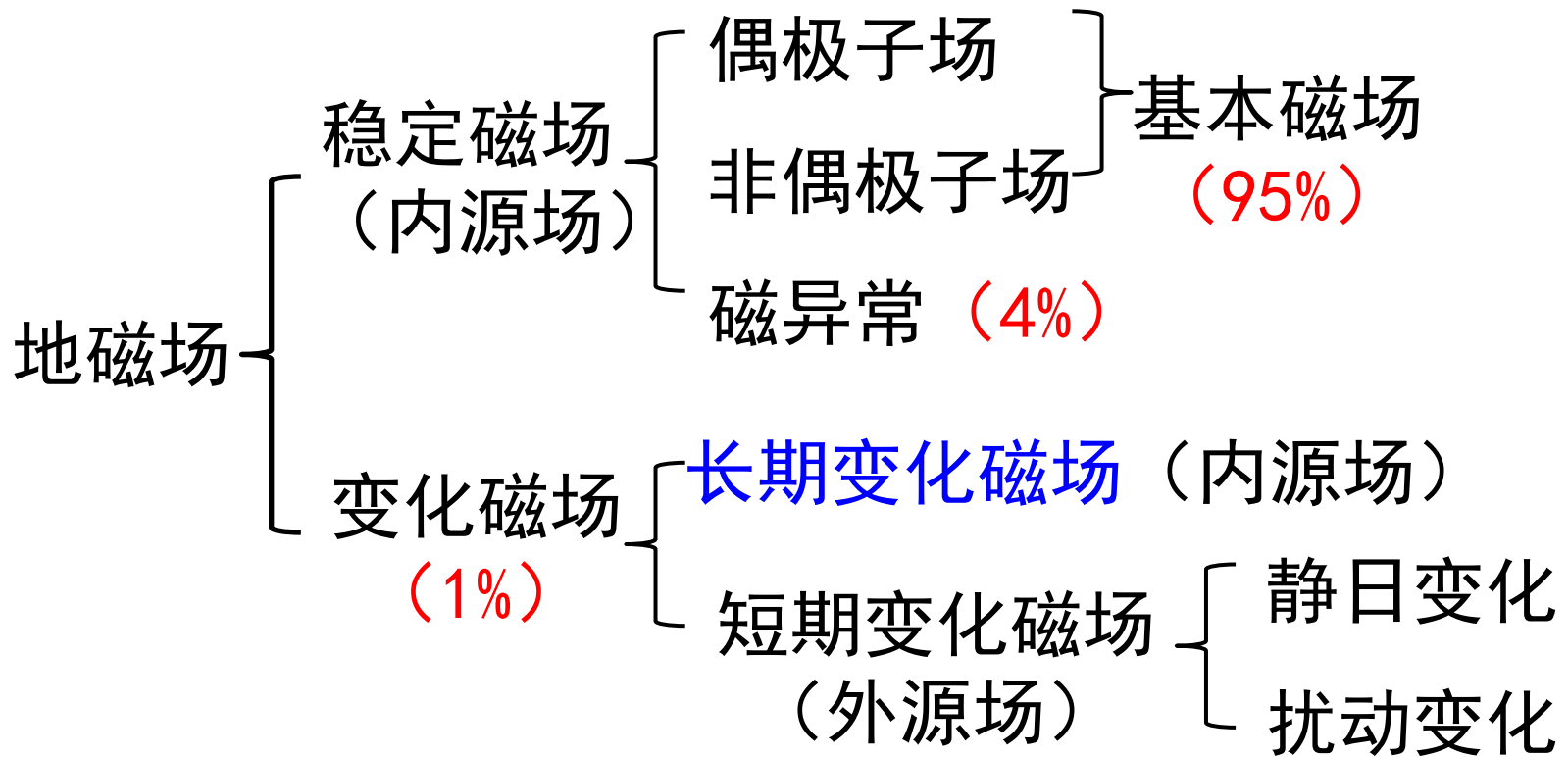
3. 地球磁场

■ 地磁场的组成

		成分	场源位置	最大强度 <u>nT</u>	形态特征	时间特征	应用
内源场	1	主磁场	地球外核	~60000	偶极子场为主	百年~千年尺度长期变化和百万年的倒转	控制其他磁场成分，用于导航等
	2	局部场 (地壳磁场)	居里面以上的地壳和上地幔	~100000nT，但地表大部分地区<1000 <u>nT</u>	空间分布极不规则，波长可<1 米	基本稳定不变	用于地球物理勘探、海底扩张速率
	3	感应场	地壳、上地幔和海洋	约为外源变化场的 1/2	一般为全球场，但许多地方不规则	与外源场相同	确定地壳和地幔的电性
外源场	4	平静变化 (Sq 和 L)	主要在电离层	Sq: 30~200 <u>nT</u> L: 1~10 <u>nT</u>	全球场，白天变化显著	Sq: 24h 及其谐波 L: 24 h 50 min 及其谐波	电离层潮汐风、电导率和发电机过程
	5	扰动变化：磁暴	磁层和电离层	50~1000 <u>nT</u>	全球水平分量同时减小	初相、主相和恢复相，持续一天到几天	监测太阳活动、磁层活动、太阳风-磁层耦合，空间天气预报
	6	扰动变化：亚暴	电离层和磁层	100~2000 <u>nT</u>	集中在高纬度，极光带最强	不规则变化，分增长相、膨胀相和恢复相，持续三十分种到几个小时	监测太阳活动、磁层活动、太阳风-磁层-电离层耦合，空间天气预报
	7	扰动变化：脉动	磁层和电离层	1~100 (Pg)	准全球场，极光带附近最强	1-300 秒，准周期	监测磁层过程、太阳风-磁层耦合

3. 地球磁场

■ 地磁场的组成



对应用地磁学，用4%的磁异常解决80%的应用问题

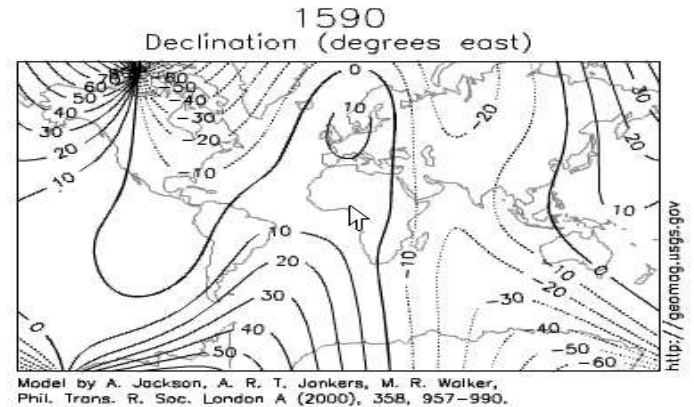
地磁场的长期变化

通过世界各地地磁台长期连续观测 进行研究

通过古地磁研究

近几百年数据的统计分析：

- ✓ 地球磁矩的衰减变化
- ✓ 地球磁场向西漂移



近1000 年来，地磁场偶极矩大约减小了 25 %

其中，17 %是近400 年来减小的

1835年（高斯计算）为 $8.5 \times 10^{22} \text{ Am}^2$

1900年为 $8.32 \times 10^{22} \text{ Am}^2$

1980年为 $7.91 \times 10^{22} \text{ Am}^2$

2000年为 $7.78 \times 10^{22} \text{ Am}^2$

两千年后，接近0！磁极倒转（？）

Halley 在300 多年前就已经注意到的地磁场西漂现象；（后来通过对地磁图的研究，比较容易发现）目前，人们普遍承认的西漂速度是每年约 0.18° ，周期约600年地磁场除了西漂外，还有更缓慢的北漂。

磁极倒转



磁极倒转

在测定岩石的**剩余磁性**时，发现相当一批**岩石的磁化方向与现在的地磁场方向相反**，于是就推测地磁场发生了 180° 的改变，原来的磁北极转变为磁南极，磁南极则变成了磁北极。这种现象被称为地磁极倒转或地磁场翻转。事实证明，在地球历史上确实发生过这种变化，而且还一再地发生。

地磁场极性倒转的发现极大地推动了古地磁学的发展

在全球广泛开展了对火山岩、沉积岩、海底和湖底沉积的古地磁测量。（**黄土沉积的古地磁研究**带着我国独有的特色）

由此产生的“**地磁极性年表**”，为地质学提供了一个独立的时间标尺。

从1940s开始，由于军事上的需要对海底磁场进行了系统的观测：发现以大洋脊为中心，两侧对称地交替分布着**正磁极性（磁极与现代的一致）与反磁极性（磁极与现代相反）的两类岩石**：离扩张中心越远，岩石年龄越老，为地球科学中的板块构造理论的出现，提供了重要的依据。

随着取得的资料增多，逐步建立了以不同时期**地磁极翻转为主要特征的地磁年代表**。一种地磁极性期平均可持续22万年（短的仅持续3万年，长的可达500万年）。每次磁极倒转过程仅持续数百年到上千年，此时表现为**磁场强度大幅度减弱，磁极缓慢转动，直到完全翻转，才达到稳定**。

3. 地球磁场

■ 地磁场的起源

✓地磁场的起源问题至今仍是地球科学研究的重要问题之一。

人们曾经提出过有关地磁场起源的各种假设，试图来解释地球基本磁场的起源，但是都不能得到满意的解释。

✓大量的地磁资料，丰富的地磁现象强烈地吸引着长于理性思维，爱好寻根问底的数学家、物理学家

✓地球磁场：令科学家着迷

3. 地球磁场

■ 地磁场的起源

- ✓ 从1600年英国人吉尔伯特（Gilbert）提出（假说）：地球磁场起源与地球内部，像个永久磁铁；
- ✓ 1839年，德国著名数学家Gauss把位场理论用于地磁场研究，从而奠定了近代地磁学的数学基础。Gauss的计算指出，地磁场主要起源于地球内部。这一结论看起来与200多年前Gilbert的猜想不谋而合，但Gauss的结论是依据严格的位场理论的，是对Gilbert假说的物理证明。

3. 地球磁场

■ 地磁场的起源

物理学家不满足于“地磁场起源于地球内部”这一简单论断，他们更感兴趣的是：

- “地球内部”究竟是什么地方？
- 那里的物质处于怎样的物理状态？
- 发生着怎样的物理过程？
- 人类怎样认知发生在这些不可到达地区的过程？
- 类似的过程是否在其他天体内部也存在？

从1600年英国人吉尔伯特提出永久磁化理论400多年来，至少有10多种地磁起源假说或理论问世，哪种理论更好。

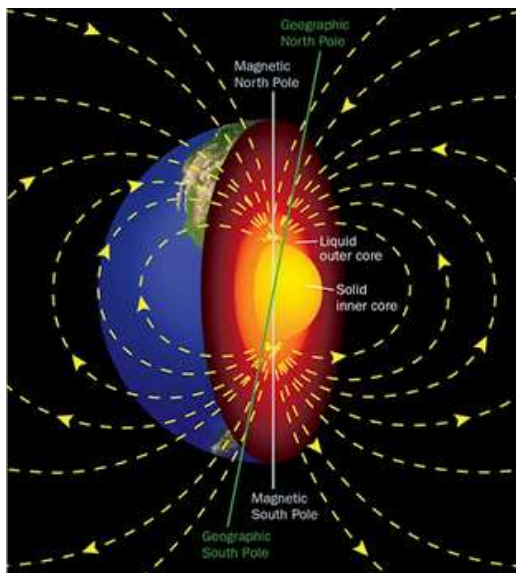
3. 地球磁场

■ 地磁场的起源

- 地磁场在近地空间的形态，接近于一个中心偶极子磁场。地磁轴偏离地球自转轴通常只是一个不大的角度，而且就大约 10^6 年的时间平均而言，地磁轴与地球自转轴相重合.
- 地球磁矩大约为 10^{22} - $10^{23} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ ，而且在整个地磁场历史中变化不大，地磁场在地面上的强度约为 $0.5 \times 10^{-4} \text{ T}$.
- 地磁场具有非偶极子场成分.
- 地磁场存在长期变化现象，并且可能具有100年、1000年和10000年量级的一些分立周期.
- 地磁场会反复发生倒转.
- 地磁场至少已存在 10^9 年.
- 其它行星的磁场机制

合理的地磁起源理论，应该能解释这些现象，并且可预测未来地磁场趋势

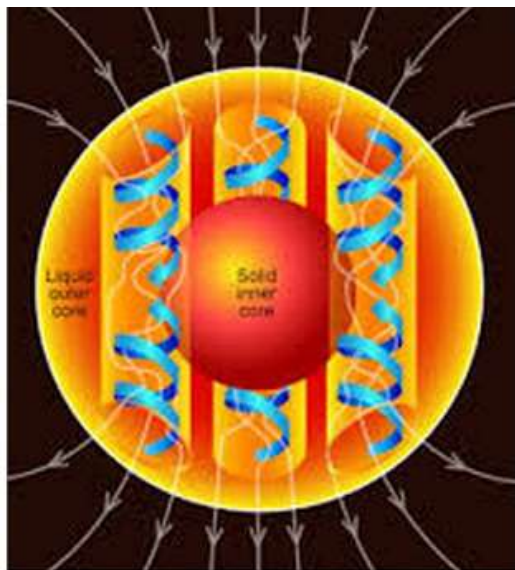
在近20-30年期间, 自激发电机效应假说较为流行



液态地核内部由于温度梯度、或温差、压力差等原因产生涡旋运动, 结果使地核成为良导体



由于地球绕轴自转所引起的回旋磁效应就存在一微弱初始磁场, 虽然比地磁场小10倍, 但对于引起再生效应来说已经足够



地核电流体形成, 通过感应方式电流自身形成的场又可以连续不断地再生磁场, 从而增强了原来的磁场, 由于地核电流体持续运动而不断提供能量, 因而引起一种自激发电机效应



由于能量的不断消耗和供应, 磁场增强到一定程度就会稳定下来, 形成现在的地球基本磁场

这种假说不仅能定性解释地磁偶极子场和非偶极子场的起源，而且也能解释地球磁轴倒转等现象，是最可取的地磁场成因理论之一。但也存在一定问题，尚待进一步研究。

基底岩浆海洋产生假说



地球磁场是怎么形成的？

3. 地球磁场

■ 地磁场的解析表示

- **地磁场的球谐分析方法**是1833年由高斯首先提出，该方法表示全球范围地磁场的分布及其变化的一种**数学方法**。



高斯



球谐分析可以近似表示哪一类地球磁场？

3. 地球磁场

■ 地磁场的解析表示

$$\nabla^2 U = 0 \quad (\text{场源外})$$

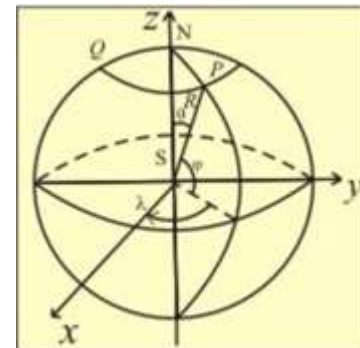
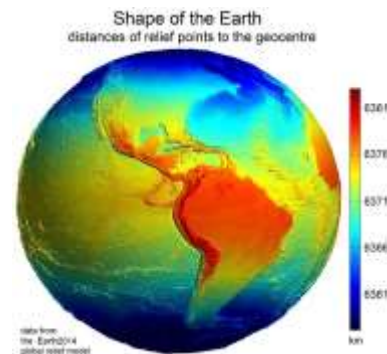
条件：球体，磁场的场源来自地球内部

在球坐标系下，通过分离变量法，可以推导出其解析表达式

$$U = \frac{R}{\mu_0} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \cdot [g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)] \cdot \vec{P}_n^m(\cos \theta)$$

其中 g_n^m h_n^m 称为高斯球谐系数

U 推导出 X , Y , Z , ...



3. 地球磁场

■ 地磁场的解析表示

$$U = \frac{R}{\mu_0} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \cdot [g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)] \cdot \vec{P}_n^m(\cos \theta)$$

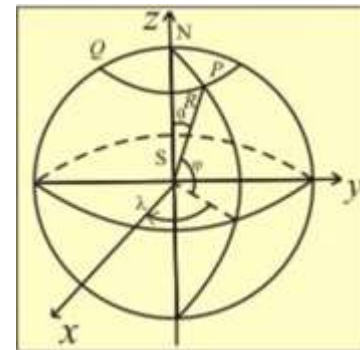
g_n^m h_n^m 为高斯球谐系数

高斯球谐系数的获取

实测 X_i, Y_i, Z_i, \dots

$\rightarrow g_n^m \ h_n^m$

$\rightarrow U \rightarrow X, Y, Z, \dots$



3. 地球磁场

■ 地磁场的解析表示

- 1968年国际地磁和高空物理协会（IAGA）首次提出高斯球谐分析模式，并在1970年正式批准了这种模式，称为国际地磁参考场模型（IGRF）。
- 由一组高斯球谐系数和年变系数组成。
- 地球基本磁场和长期变化场的数学模型；国际上规定每5年发表一次球谐系数，及绘制一套世界地磁图。

the new Geomag 7.0 software. ([Windows](#)

omagnetic Reference Field — the latest
h's deep interior, its crust and its ionosphere
n December 2014. The IGRF is the product of
c field data from satellites and from

source-free regions at the Earth's surface and represented by a truncated series expansion:

members of IAGA Working Group V-MOD. Their programmes and World Data Centers are to be

Patrick Alken, Julien Aubert, Olivier Barrois,
de Coisson, Francois Civet, Aimin Du,
ika Korte, Weijia Kuang, Xavier Lalanne,
5)

3. 地球磁场

■ 地磁场的解析表示

世界地磁模型（**World Magnetic Model, WMM**）。

- 由美国国家地理空间情报局（National Geospatial Intelligence Agency, NGA）和英国国防地理中心（Defence Geographic Centre, DGC）提供资助，并由美国国家地球物理数据中心（NGDC）联合英国地质调查局（British Geological Survey, BGS）共同研制的世界地磁模型。
- WMM模型、相关软件和数据文件由NGA授权NGDC每隔5年更新发布一次，最新的世界地磁模型 WMM2015于2014年12月发布，有效使用期为2015-01-01~2019-12-31。
- 该模型所使用的数据主要包括卫星磁测和地面台站时均值两种类型，球谐系数12阶，对应的空间分辨率为3200 km。



Home

Background

Brief description of geomagnetism and observation systems

About WMM

Learn more about model derivation, uncertainties and magnetic poles

Model & Software

Download model coefficients, software and documentation

Online Calculators

Calculate magnetic field values at or near the Earth surface

Maps

Browse imagery and contour maps for main field and secular change

Uses of WMM

Common applications of WMM

License

License and copyright information



The World Magnetic Model

The World Magnetic Model is a joint product of the United States' National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) and the United Kingdom's Defence Geographic Centre (DGC). The WMM was developed jointly by the National Geophysical Data Center (NGDC, Boulder CO, USA) (now the National Centers for Environmental Information (NCEI)) and the British Geological Survey (BGS, Edinburgh, Scotland).

The World Magnetic Model is the standard model used by the U.S. Department of Defense, the U.K. Ministry of Defence, the North Atlantic Treaty Organization (NATO) and the International Hydrographic Organization (IHO), for navigation, altitude and heading referencing systems using the geomagnetic field. It is also used widely in civilian navigation and heading systems. The model, associated software, and documentation are distributed by NCEI on behalf of NGA. The model is produced at 5-year intervals, with the current model expiring on December 31, 2019.

WMM2015 Is Released!

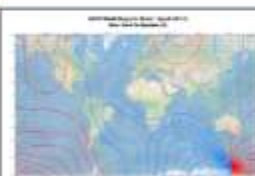
[Download WMM2015 Model and Software](#)

[WMM2015 Technical Report / Test Values \(pdf\)](#)

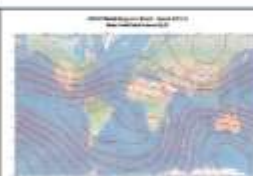
[Use latest WMM in the Magnetic Field Calculators](#)

Please contact geomag.models@noaa.gov for comments or questions.

[NOAA Press Release](#)



WMM 2015 Declination Map



WMM 2015 Total Intensity Map

[Metadata for WMM](#)

3. 地球磁场

■ 地磁场的解析表示

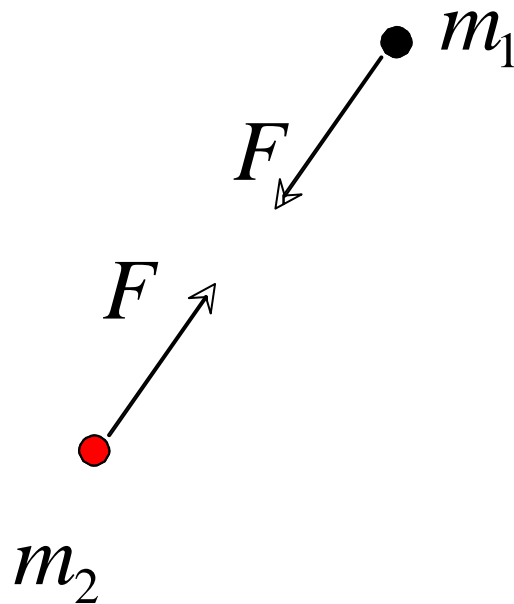
假设：当地球均匀磁化，且磁轴与地理旋转轴重合时，地球的基本磁场可以简化为偶极子磁场

$$F = G \frac{m_1 \bullet m_2}{r^2}$$

将单位质量质点从无穷远移至该点时，引力场所做的功

引力场强度 $g = \text{grad} V = \nabla V$

$$V = G \frac{m}{r}$$



3. 地球磁场

■ 地磁场的解析表示

假设：当地球均匀磁化，且磁轴与地理旋转轴重合时，地球的基本磁场可以简化为偶极子磁场

假设有孤立磁荷，则也有磁力（电磁库仑定律）

$$F = G \frac{m_1 \bullet m_2}{r^2}$$

$$g = G \frac{m}{r^2}$$

$$g = \text{grad} V = \nabla V$$

$$V = G \frac{m}{r}$$

$$F = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{q_{m1} q_{m2}}{r^2}$$

$$H = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{q_m}{r^2}$$

$$H = -\nabla U$$

$$U_m = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{q_m}{r}$$

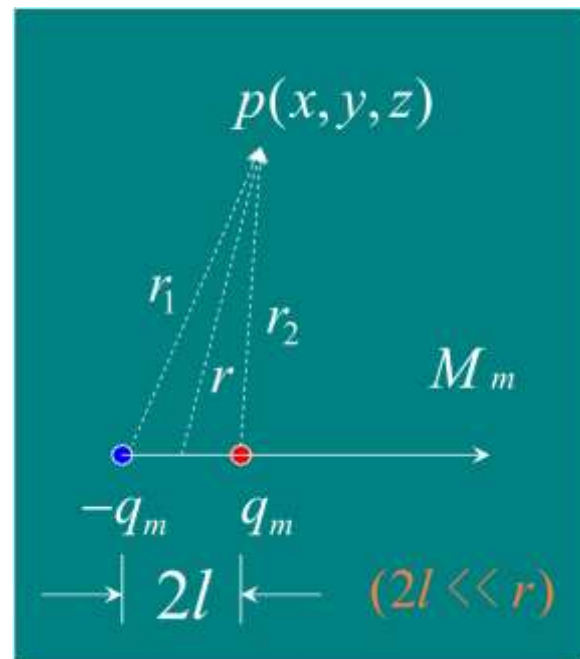
3. 地球磁场

■ 地磁场的解析表示

假设：当地球均匀磁化，且磁轴与地理旋转轴重合时，地球的基本磁场可以简化为偶极子磁场

P 点磁位 U

$$\begin{aligned} U &= U_{+q_m} + U_{-q_m} \\ &= \frac{1}{4\pi\mu_0} \left(\frac{q_m}{r_2} - \frac{q_m}{r_1} \right) \end{aligned}$$



$$U = \frac{1}{4\pi\mu_0} \left(\frac{q_m}{r_2} - \frac{q_m}{r_1} \right)$$

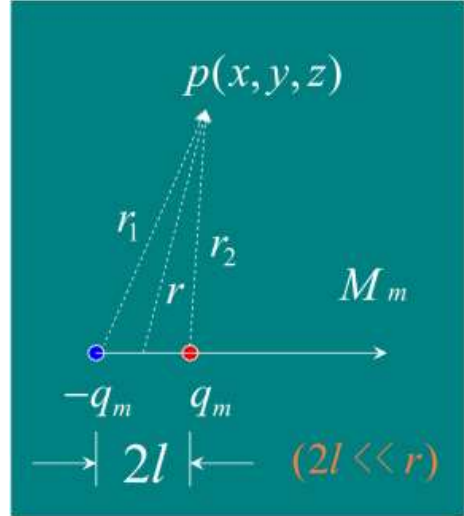
$$= \frac{1}{4\pi\mu_0} \left(\frac{q_m}{r - l \cos \theta} - \frac{q_m}{r + l \cos \theta} \right)$$

$$= \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{q_m}{r} \left(1 + \frac{l}{r} \cos \theta + \cdots - 1 + \frac{l}{r} \cos \theta + \cdots \right)$$

$$\approx \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{2q_m l}{r^2} \cos \theta$$

$$= \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{M_m}{r^2} \cos \theta$$

$$= \frac{1}{4\pi} \frac{M}{r^2} \cos \theta$$

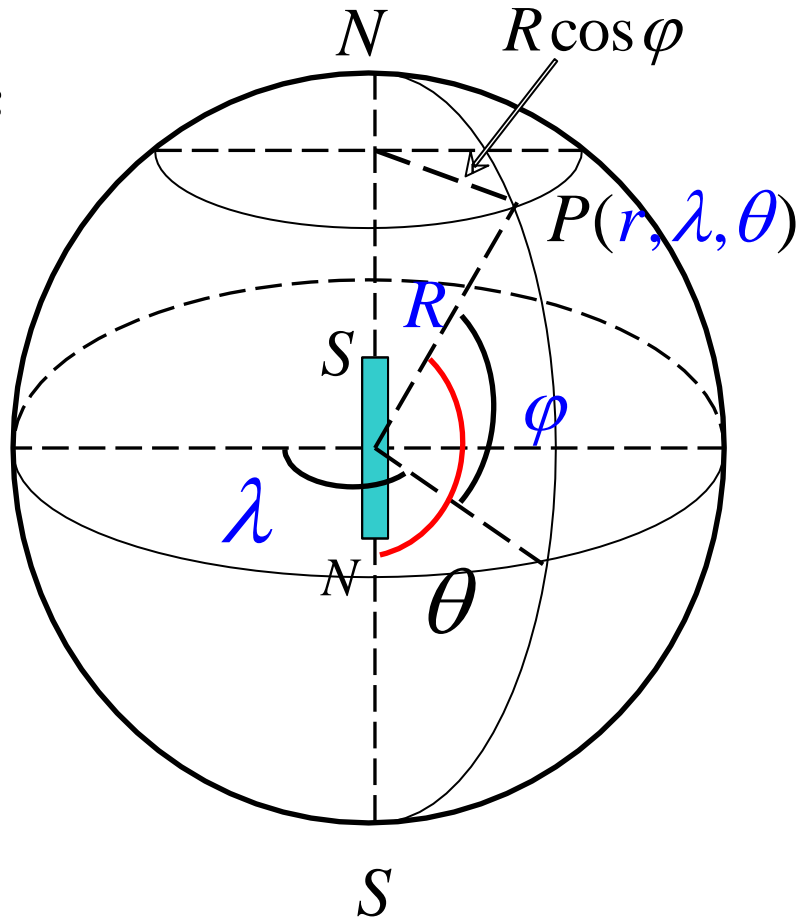
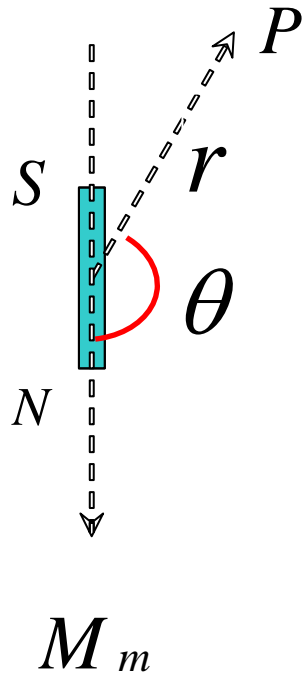


(磁偶极矩 $M_m = 2q_m l$)

(磁矩 $M = \frac{M_m}{\mu_0}$)

地球的磁场（偶极子场）

- 地表任意点 P 处磁位：



3. 地球磁场

■ 地磁场的解析表示

假设：当地球均匀磁化，且磁轴与地理旋转轴重合时，地球的基本磁场可以简化为偶极子磁场

$$U = \frac{1}{4\pi} \frac{M}{r^2} \cos \theta,$$

$$\mathbf{T} = -\mu_0 \nabla U$$

$$\theta = 90^\circ + \varphi,$$

$$r = R,$$

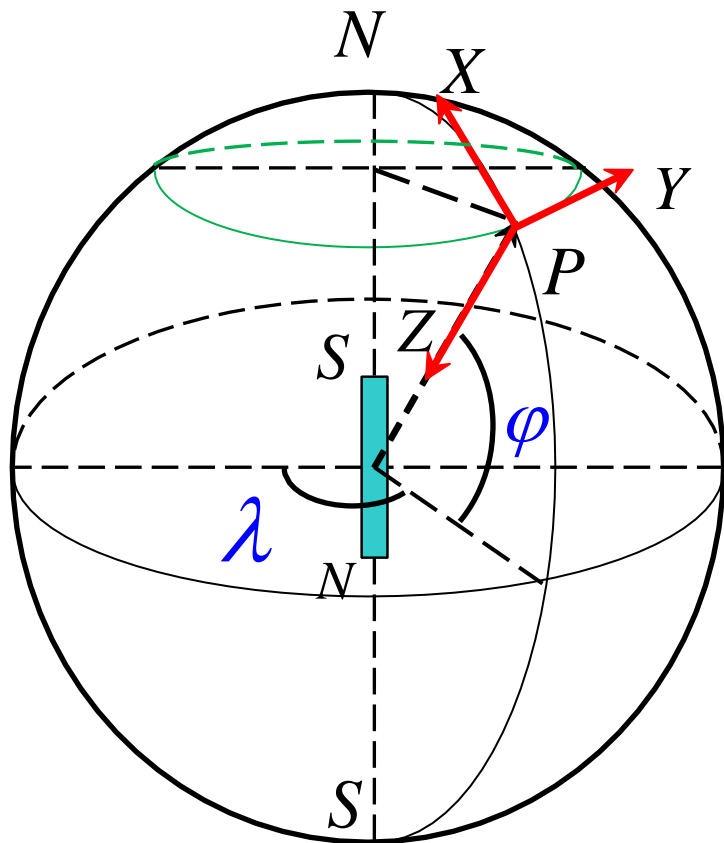
$$= -\mu_0 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial U}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial U}{\partial z} \mathbf{k} \right)$$

- 则P点磁位：

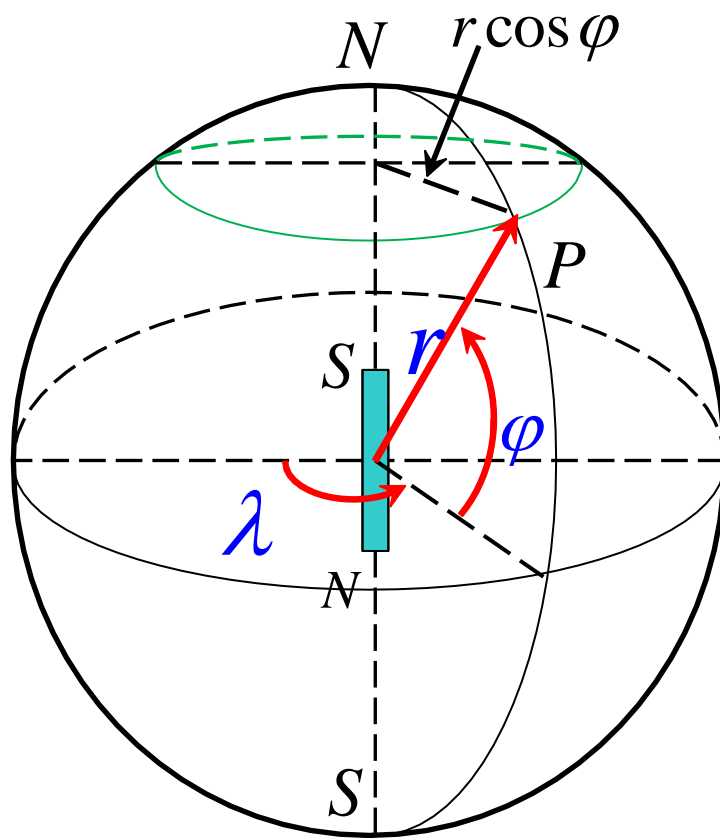
$$U = -\frac{1}{4\pi} \frac{M}{R^2} \sin \varphi$$

因为： $\mathbf{T} = X\mathbf{i} + Y\mathbf{j} + Z\mathbf{k}$

地球的磁场（偶极子场）



直角坐标系变量与球心
球坐标系有如下关系：



$$dx = r \cdot d\varphi$$

$$dy = r \cdot \cos \varphi \cdot d\lambda$$

$$dz = -dr$$

3. 地球磁场

■ 地磁场的解析表示

假设：当地球均匀磁化，且磁轴与地理旋转轴重合时，地球的基本磁场可以简化为偶极子磁场

$$X = H = -\mu_0 \frac{\partial U}{r \partial \varphi} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{R^3} \cos \varphi,$$

$$Y = 0,$$

$$Z = \mu_0 \frac{\partial U}{\partial r} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2M}{R^3} \sin \varphi,$$

$$U = -\frac{1}{4\pi} \frac{M}{R^2} \sin \varphi$$

$$|T| = \sqrt{H^2 + Z^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{R^3} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \varphi}$$

3. 地球磁场

■ 地磁场的解析表示

假设：当地球均匀磁化，且磁轴与地理旋转轴重合时，地球的基本磁场可以简化为偶极子磁场

*P*点磁倾角：

$$\tan I = \frac{Z}{H} = 2 \tan \varphi$$

在两极： $\varphi = \pm 90^\circ$,

$$Z = \pm \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2M}{R^3} = T, \quad H = 0, \\ I = \pm 90^\circ$$

3. 地球磁场

■ 地磁场的解析表示

假设：当地球均匀磁化，且磁轴与地理旋转轴重合时，地球的基本磁场可以简化为偶极子磁场

• 在赤道：

$$\varphi = 0^\circ,$$

$$Z = 0,$$

$$H = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{R^3} = T$$

$$I = 0^\circ$$

3. 地球磁场

■ 地磁场的解析表示

假设：当地球均匀磁化，且磁轴与地理旋转轴重合时，地球的基本磁场可以简化为偶极子磁场

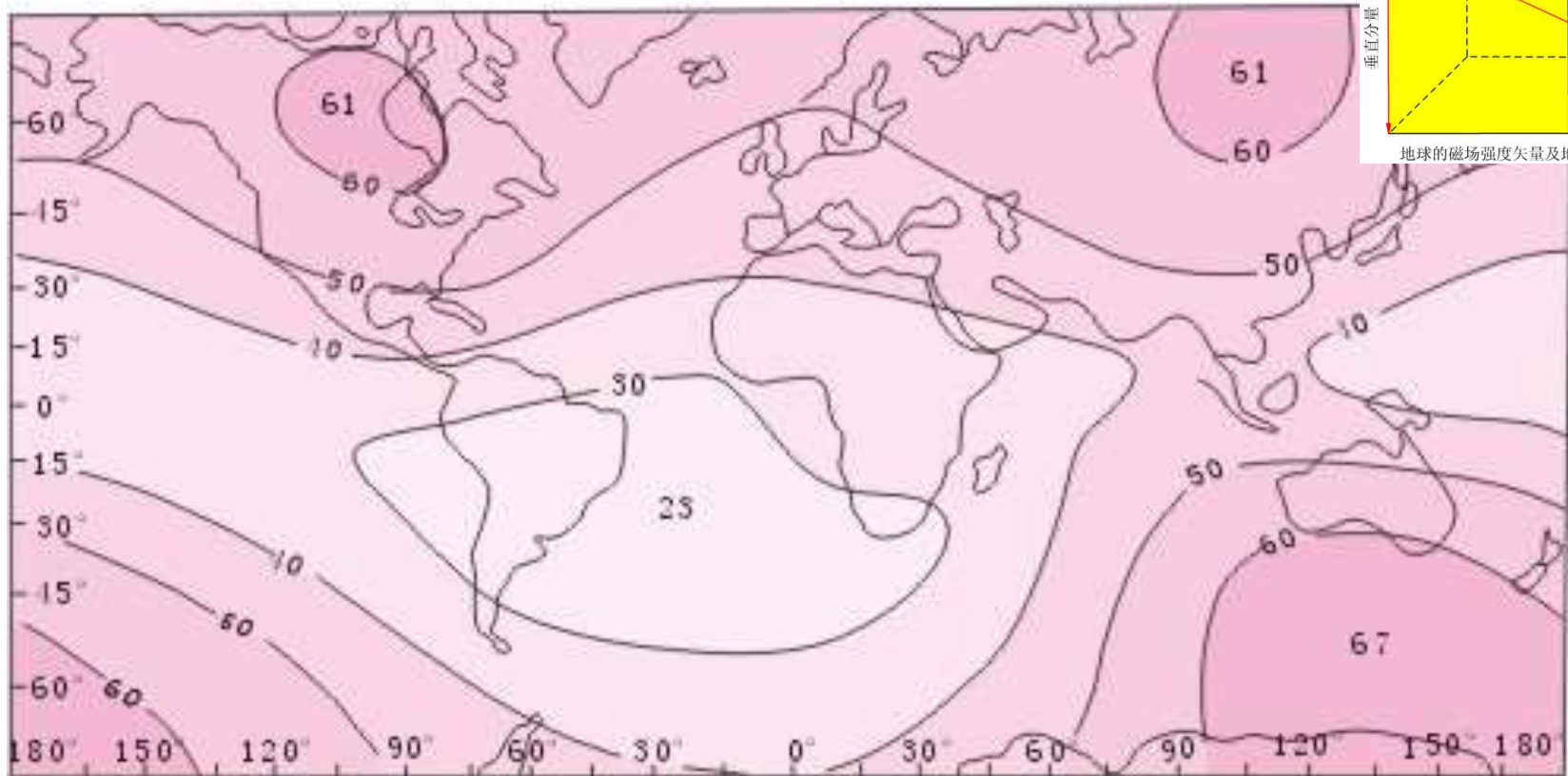
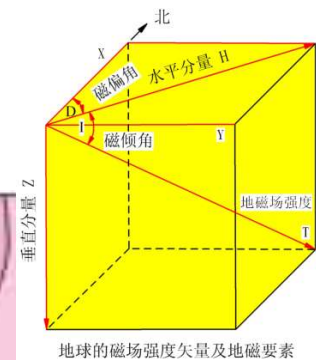
在赤道：

$$\begin{aligned}\varphi &= 0^\circ, \\ Z &= 0, \quad H = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{R^3} = T\end{aligned}$$

在两极： $\varphi = \pm 90^\circ$,

$$Z = \pm \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2M}{R^3} = T, \quad H = 0,$$

地磁两极的磁场强度是地磁赤道上的值的两倍，这一关系对偶极子场严格成立而对实际地磁场仅近似成立。



1980年代世界地磁场总场强度等值线平面图（单位 10^3nT ）

- 地磁总强度等值线与纬度线近乎平行，其强度值在磁赤道附近约为30000–40000 nT，向两极增大，在两极约是60000–70000 nT。

3. 地球磁场

■ 地磁场的解析表示

垂直梯度：沿垂直方向移动单位距离地磁要素的变化值

水平梯度：沿水平方向（x，子午线方向）移动单位距离地磁要素的变化值

$$\begin{aligned}\frac{\partial Z}{\partial r} &= -\frac{3\mu_0 M \cos \varphi}{4\pi R^4} = -\frac{3}{R} Z, & \frac{\partial Z}{R\partial \varphi} &= \frac{\mu_0 M \sin \varphi}{2\pi R^4} = \frac{2}{R} H, \\ \frac{\partial H}{\partial r} &= -\frac{6\mu_0 M \sin \varphi}{4\pi R^2} = -\frac{3}{R} H, & \frac{\partial H}{R\partial \varphi} &= \frac{\mu_0 M \cos \varphi}{4\pi R^4} = -\frac{Z}{2R}.\end{aligned}$$

由于Z和H与地磁经度无关，所以它们沿地磁东西方向的水平梯度等于零。

地磁场随地理坐标和高度的变化而变化。

目 录

地磁部分章节

第一章 地球磁场

1. 人类对于地磁场的认识
2. 基本概念
3. 地球磁场
4. 岩石的磁性

4. 岩石的磁性

- 地壳中岩石和矿体处在地球磁场中，从它们形成时起，就受其磁化而具有不同程度的磁性，其磁性差异在地表引起磁异常。
- 研究岩石磁性，其目的在于掌握岩石和矿物受磁化的原理，了解矿物与岩石的磁性特征及其影响因素，以便正确确定地磁学能够解决的地质任务，以及对磁异常作出正确的地质解释。
- 有关岩石磁性的研究成果，也可直接用来解决某些基础地质问题，如区域地层对比，构造划分等。

- 理论基础——地球磁场与岩石磁性
- 数据观测——磁力仪与工作方法
- 数据处理与解释——磁场的叠加性、磁场与磁源的关系

场源的情况——地质认识

4. 岩石的磁性

■ 表征磁性的物理量

- 磁化强度、感应磁化强度、剩余磁化强度、总磁化强度、磁化率

- **磁化强度** M

均匀无限磁介质，受外部磁场 H 作用，衡量物质被磁化程度的物理量。

$$M = \kappa H$$

κ

4. 岩石的磁性

■ 表征磁性的物理量

- 磁化强度 M

- ✓ 感应磁化强度 M_i

位于岩石圈中的地质体，受到现代地磁场的磁化而具有的磁化强度

$$M_i = \kappa H_i = \kappa (T / \mu_0)$$

感应磁化强度不仅取决于岩石本身的磁性，还取决于现今地磁场的强度和方向。地球主磁场随经纬度而变，同样的磁体在地球不同位置所产生的感应磁化强度是不同的。

感应磁化的纬度效应

磁场 H 和 磁感应强度 B

$$\mu_0 H = B$$

$$\mu H = B \quad \text{真空中}$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r = \mu_0 (\kappa + 1)$$

$$\begin{aligned} B &= \mu H = \mu_0 (\kappa + 1) H \\ &= \mu_0 (\kappa H + H) = \mu_0 (M + H) \end{aligned}$$

磁场由地球基本磁场叠加感应磁场组成

4. 岩石的磁性

■ 表征磁性的物理量

- 磁化强度 M

- ✓ 剩余磁化强度 M_r

岩矿石在生成时，处在一定的条件下，受当时的地磁场磁化、成岩后经历漫长的地质年代，所保留下来的磁化强度，记为

$$M_r$$

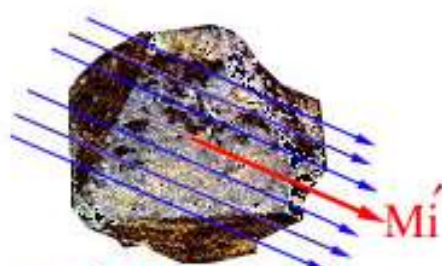
- ✓ 岩石的总磁化强度
由两部分组成

$$M = M_i + M_r = \kappa(T/\mu_0) + M_r$$

4. 岩石的磁性

■ 表征磁性的物理量

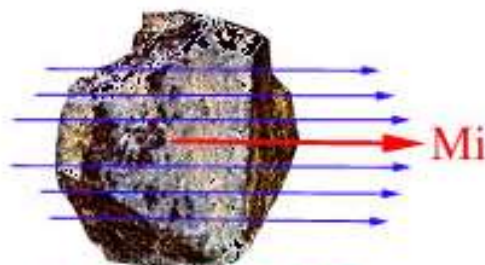
• 磁化强度 M



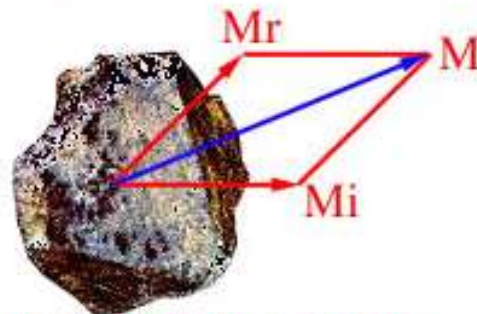
(a) 岩矿石受当时地磁场的作用



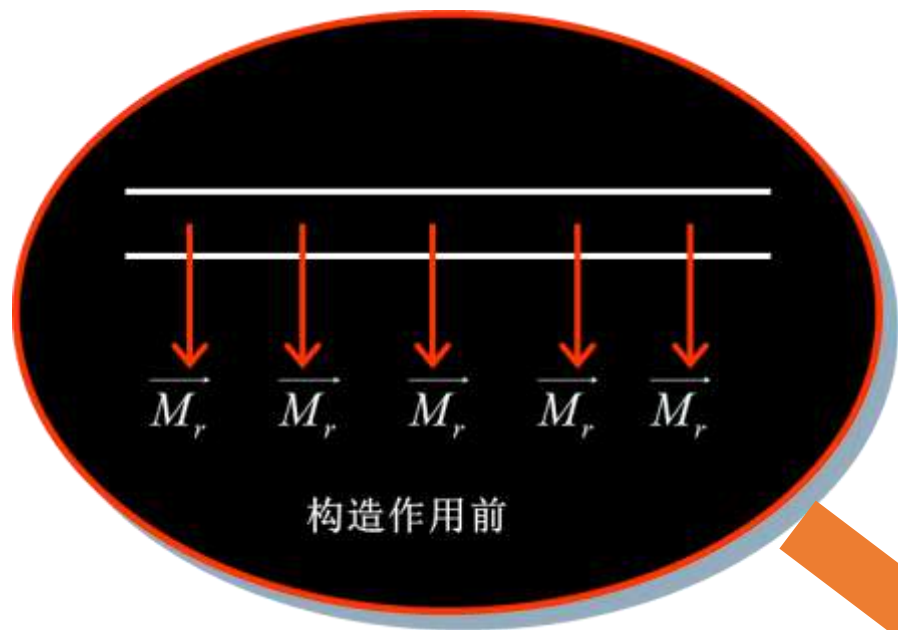
(b) 经历了构造变动剩磁的方向变化



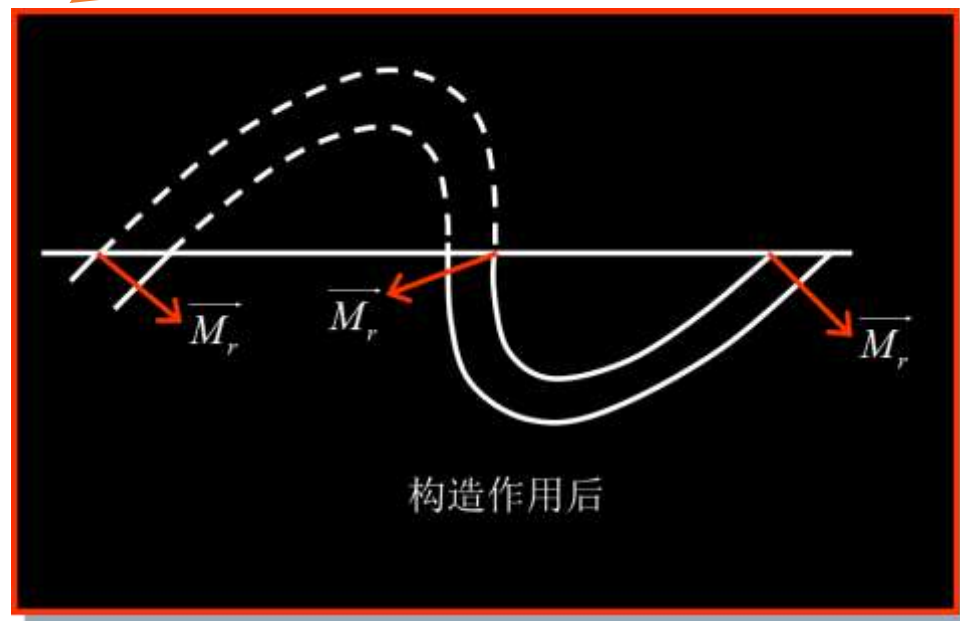
(c) 现代地磁场作用



(d) 总磁化强度是 M_r 与 M_i 的合矢量



(张世晖, 2012)



4. 岩石的磁性

■ 表征磁性的物理量

- **κ : 物质磁化率**

表征物质受磁化的难易程度，是无量纲的物理量，但 κ 仍注以单位。

- 在**SI**制中： κ 单位注明为SI (κ)，磁化强度单位为A/m；
- 在**CGSM**制中： κ 单位注明为CGSM (κ)，磁化强度单位为CGSM (m)
- 两者关系：
$$1 \text{ SI} (\kappa) = 1 / (4 \pi) \text{ CGSM} (\kappa)$$

4. 岩石的磁性

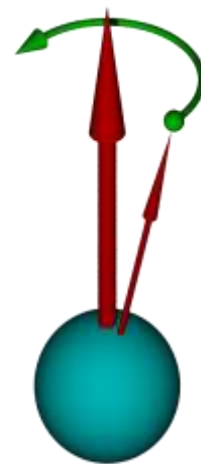
■ 物质磁性

- 任何物质的磁性都是带电粒子运动的结果。
- 分为抗磁性、顺磁性、铁磁性。

• 抗磁性

在外磁场 H 作用下，这类物质的磁化率为负值，且数值很小，约为 10^{-5} 数量级，与温度无关。抗磁性物质没有固有原子磁矩，受外磁场作用后，电子受到洛伦兹力，其运动轨迹绕外磁场旋进（拉莫尔旋进），此旋进产生附加磁矩，其方向与外磁场相反，形成抗磁性。

抗磁性是普遍的，去掉外磁场，附加磁矩消失，即磁性消失



Larmor precession

4. 岩石的磁性

■ 物质磁性

• 顺磁性

受外磁场作用，其磁化率为不大的正值，这类物质中原子具有固有原子磁矩，当无外磁场作用时，热骚动使原子磁矩取向混乱。有外磁场作用，原子磁矩顺着外磁场方向排列，显示顺磁性。

$$\kappa = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{N\mu_a^2}{3kT} = \frac{C}{T}$$

μ_a ：原子磁矩；

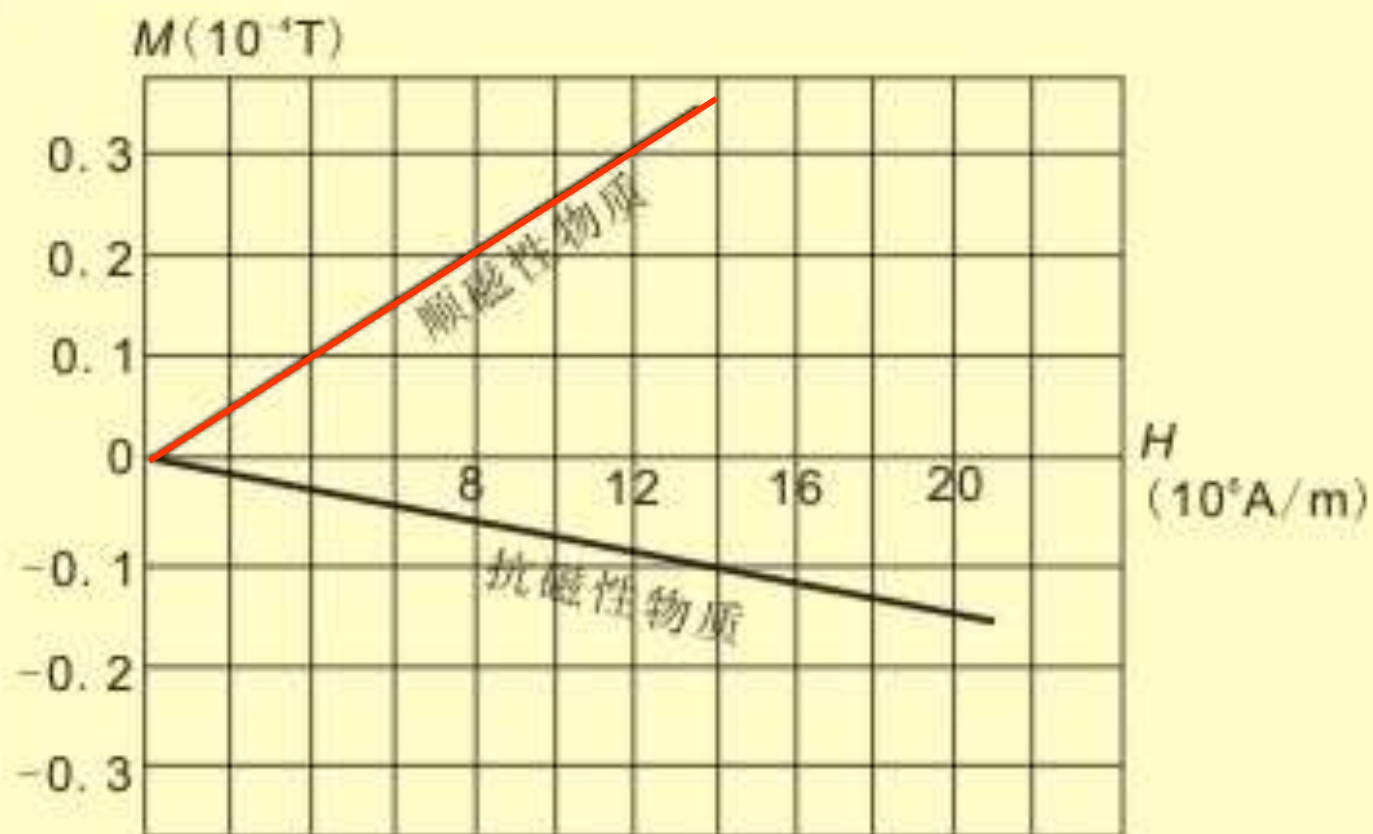
N ：单位体积物质原子数；

k ：玻尔兹曼常数；

C ：居里常数；

T ：热力学温度。

与（绝对）温度成反比（居里定律）



4. 岩石的磁性

■物质磁性

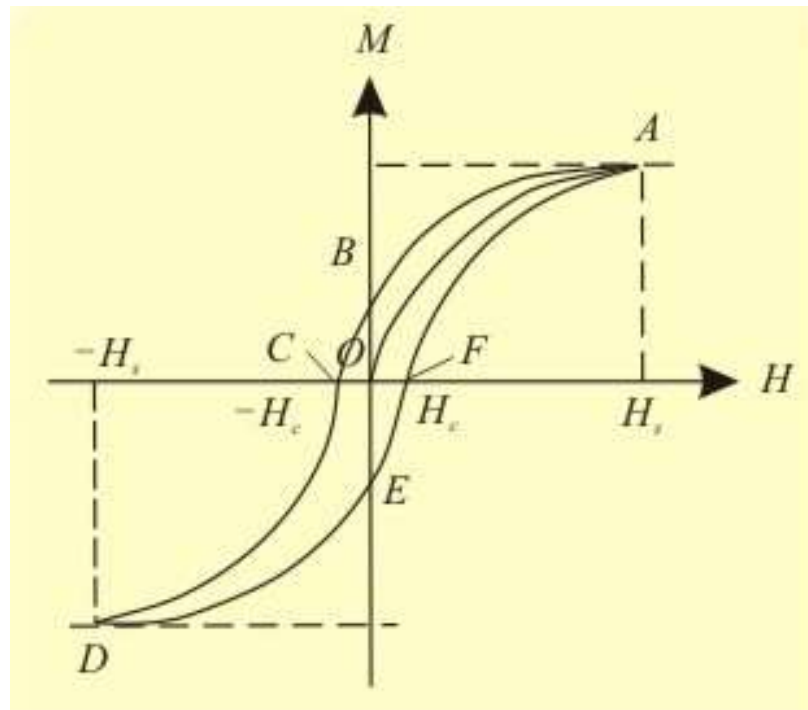
抗磁性矿物				顺磁性矿物			
名称	$\kappa \cdot 10^{-5}$ SI(κ)	名称	$\kappa \cdot 10^{-5}$ SI(κ)	名称	$\kappa \cdot 10^{-5}$ SI(κ)	名称	$\kappa \cdot 10^{-5}$ SI(κ)
石英	-1.3	方铅矿	-2.6	橄榄石	2	绿泥石	20-90
正长石	-0.5	闪锌矿	-4.8	角闪石	10-80	金云母	50
锆石	-0.8	石墨	-0.4	黑云母	15-65	斜长石	1
方解石	-1.0	磷灰石	-8.1	辉石	40-90	尖晶石	3
岩盐	-1.0	重晶石	-1.4	铁黑云母	750	白云母	4-20

4. 岩石的磁性

■ 物质磁性

• 铁磁性

在弱外磁场作用下，铁磁性物质即可达到磁化饱和，其磁化率要比抗磁性、顺磁性物质的磁化率大很多。

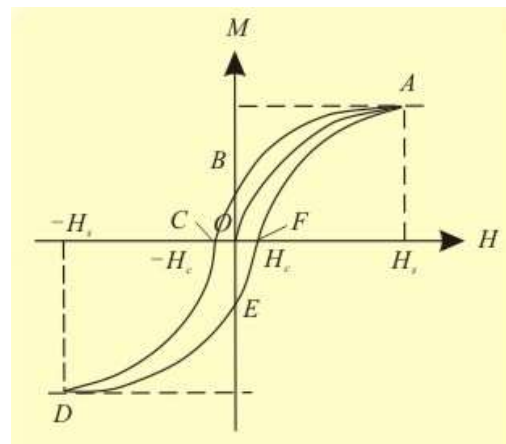


对未磁化样品施加磁场 H 的作用，随 H 值由零增至 H_s ，而后减至零，反向由零减至 $-H_s$ ，再由 $-H_s$ 增至 H_s ，变化一周。样品磁化强度 M 沿 O 、 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 、 A 变化，诸点形成曲线，称**磁滞回线**，它表明铁磁性物质的磁化强度随磁化场变化，呈不可逆性。其 H_c 称为矫顽磁力，不同磁性物质它的变化范围较大。

4. 岩石的磁性

■ 物质磁性

• 铁磁性



铁磁性磁化过程：（与外磁场关系，**温度不变**）

- ① 无外磁场作用时，各**磁畴**的取向混乱，不呈磁性；
- ② 施加外磁场时，磁畴结构发生变化，畴壁移动，磁畴转动，显示出宏观磁性；
- ③ 当外磁场增加时，磁畴的磁化方向都接近磁场的方向，外磁场继续增加时，磁化方向趋于饱和，磁化强度不再增加；
- ④ 如果减小外磁场直到零，磁化并不按原过程返回，而落后于外磁场变化，外磁场为零时，仍保留部分磁化强度（**剩余磁化强度**）。

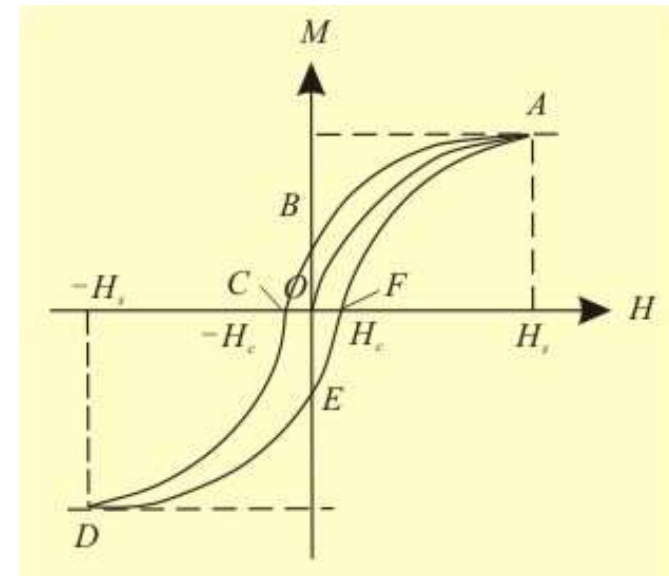
4. 岩石的磁性

■ 物质磁性

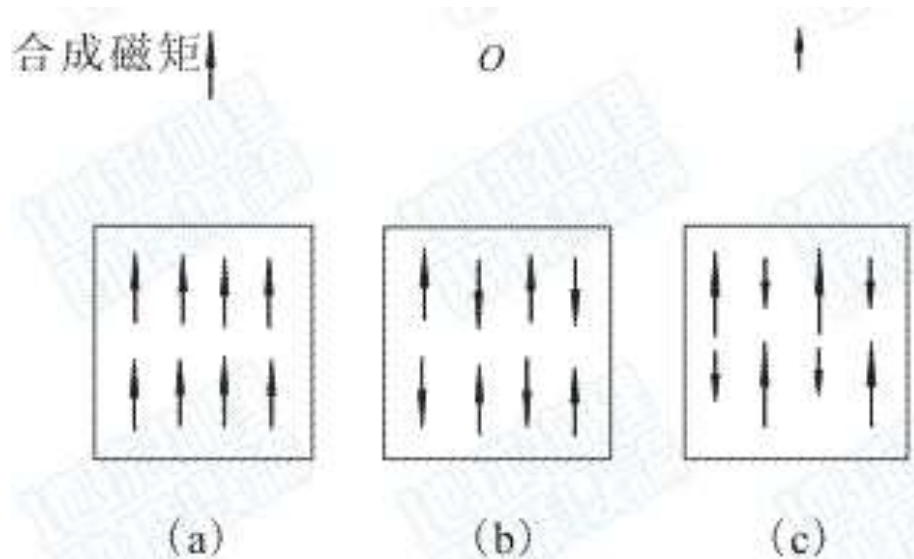
• 铁磁性

当外磁场不变时, ① 温度 $\uparrow \Rightarrow \kappa \uparrow$;

② 温度 $\uparrow \uparrow \Rightarrow \kappa \downarrow \downarrow$



- 铁磁物质内包含着很多个自发磁化区域，称为**磁畴**。由于磁畴内原子间相互作用的不同，原子磁矩排列情况有别，铁磁性分为：
- **铁磁性**：磁畴内原子磁矩排列在同一方向，例如铁、镍、钴；
- **反铁磁性**：磁畴内原子磁矩排列相反，故磁化率很小，但有很大的矫顽磁力；
- **亚铁磁性**：磁畴内原子磁矩反平行排列，磁矩互不相等，故仍有自发磁矩，有较大的磁化率和剩余磁化强度。



- 自然界中不存在纯铁磁性矿物。最重要的磁性矿物当推铁-钛氧化物。
- 地壳中纯磁铁矿少见，大多由不同比例的铁、钛、氧组成复杂的固熔体，它是典型的亚铁磁性。
- 磁铁矿不仅有较强的磁化率，且有较强的剩余磁性，其变化范围较大。

附表 铁磁性矿物磁化率

矿物	分子式	κ , SI(κ)
磁铁矿	Fe_3O_4	0.07-0.2
钛磁铁矿	$x\text{Fe}_3\text{O}_4(1-x)\text{TiFe}_2\text{O}_4$	10^{-7} - 10^{-2}
磁赤铁矿	$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.03-0.2
赤铁矿	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$	10^{-6} - 10^{-5}
磁黄铁矿	$\text{FeS}_{1+\kappa}$	10^{-3} - 10^{-4}
铁镍矿	NiFe_2O_4	0.05
锰尖晶石	MnFe_2O_3	2.0
镁铁矿	MgFe_2O_4	0.08
针铁矿	αFeOOH	$(0.02-80) \times 10^4$
纤铁矿	γFeOOH	$(0.9-2.5) \times 10^4$
菱铁矿	FeCO_3	$(20-60) \times 10^4$

4. 岩石的磁性

■影响岩石磁性的主要因素

- 与铁磁性矿物含量关系

一般来说，岩石中铁磁性矿物含量愈多，磁性也愈强。

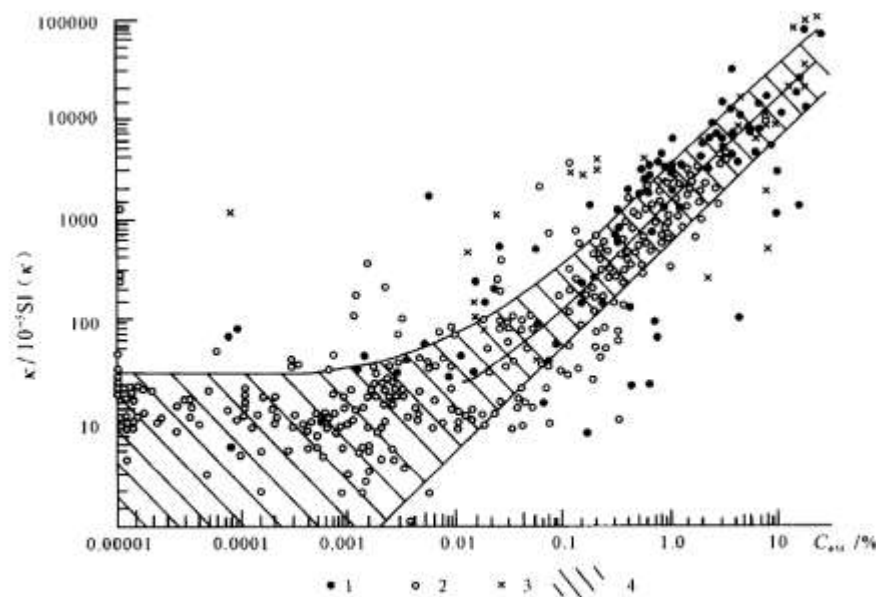


图 1-2-5 侵入岩磁化率与铁磁性组分含量的关系曲线

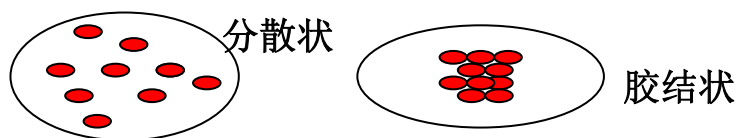
1—花岗岩类；2—闪长岩和辉长岩；3—超基性岩；4—理论计算相关分析

4. 岩石的磁性

■影响岩石磁性的主要因素

- 与磁性矿物颗粒大小结构关系

当磁性矿物相对含量、颗粒大小都相同，颗粒相互胶结的比颗粒呈分散状者磁性强。



$$(\text{半径}) \quad \rho \uparrow \Rightarrow \kappa \uparrow, \quad \rho \uparrow \Rightarrow H_c \downarrow$$

4. 岩石的磁性

■影响岩石磁性的主要因素

- 与温度、压力的关系

- A、顺磁性（居里定律）；
- B、抗磁性（无关）；
- C、铁磁性（可逆、不可逆）。

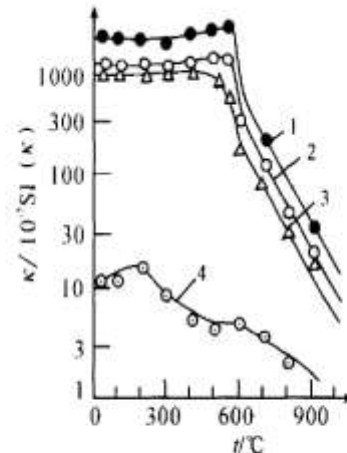


图 1-2-7 岩石磁化率与温度的关系

1—花岗闪长岩；2—黑云母角闪石花岗岩；3—闪长岩；4—黑云母花岗岩

温度增高还使矿物质矫顽力减小，使剩余磁化强度退磁。

$$T \uparrow \Rightarrow H_C \downarrow$$

4. 岩石的磁性

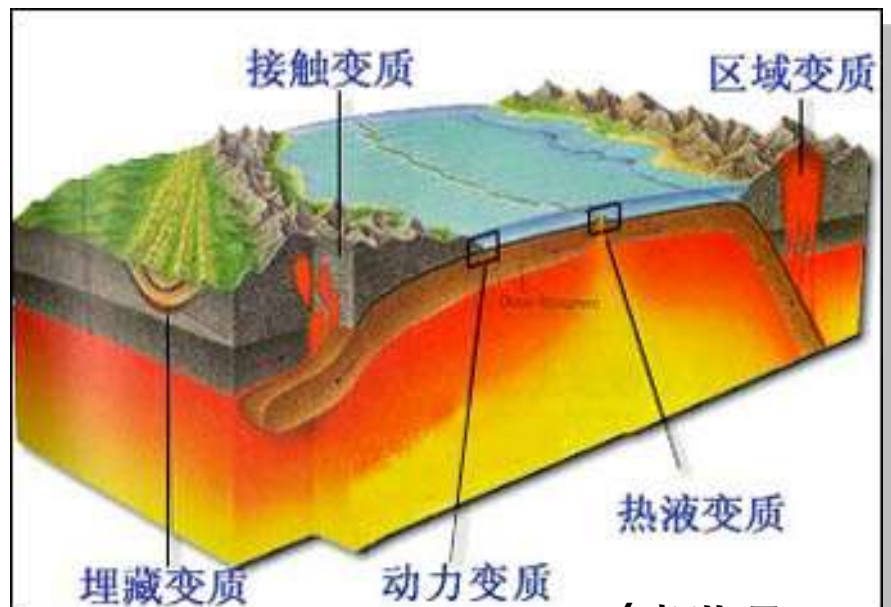
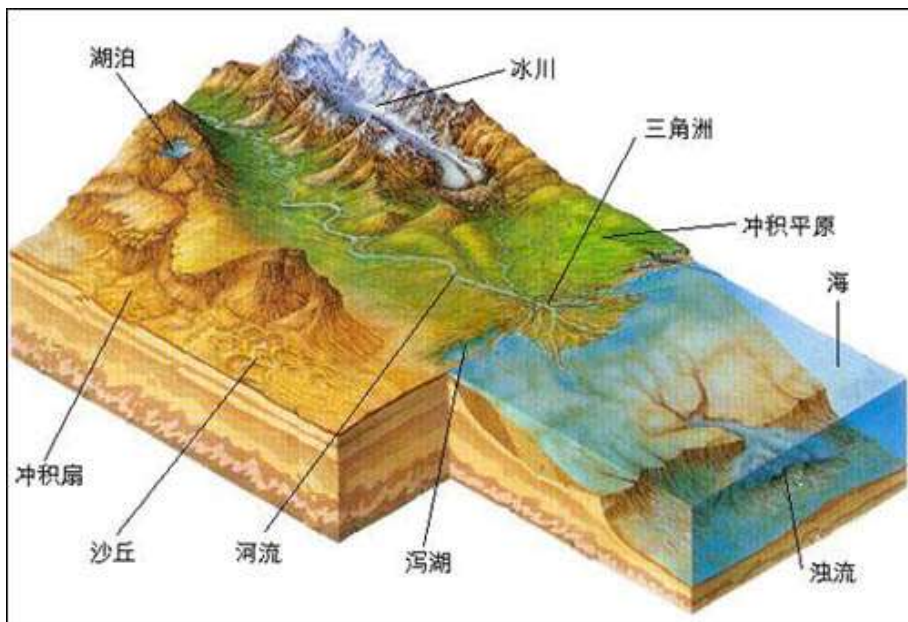
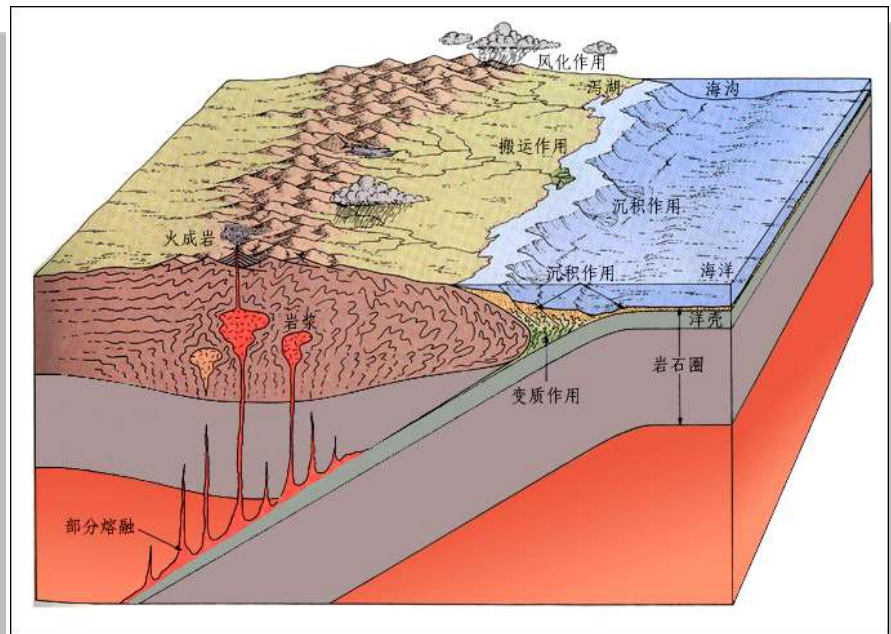
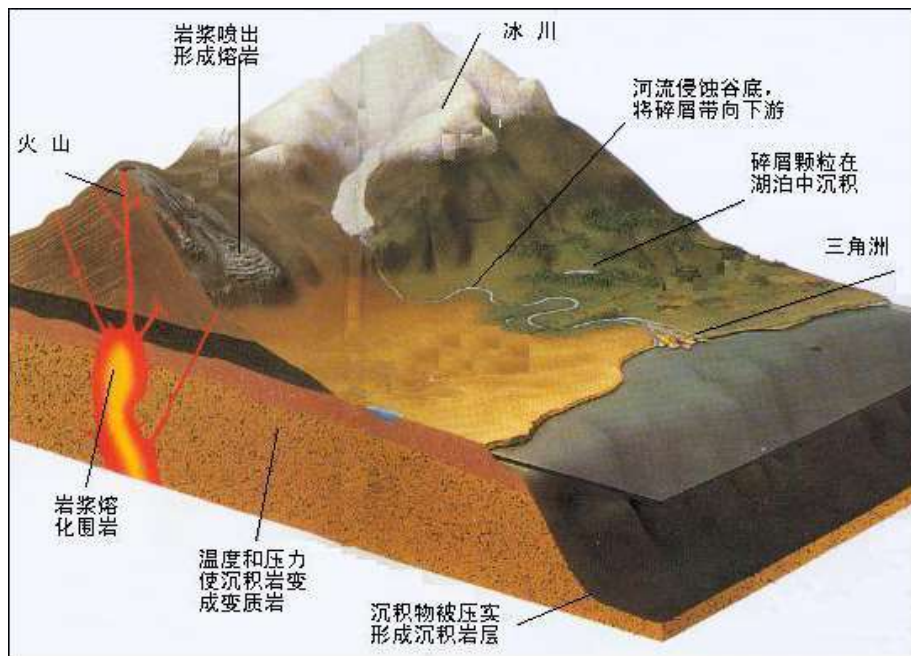
■影响岩石磁性的主要因素

- 与温度、**压力**的关系

构造运动 + 各种力（拉伸力、压力、地震振动）

压力 $\uparrow \Rightarrow \kappa \downarrow$ （平行压力方向）

压力 $\uparrow \Rightarrow \kappa \uparrow$ （垂直压力方向）
（很小）



4. 岩石的磁性

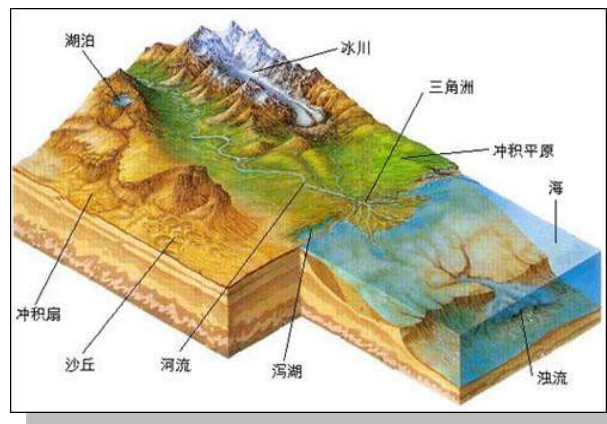
■三大岩类的磁性

•沉积岩的磁性

✓一般说来，沉积岩的磁性较弱。

✓沉积岩的磁化率主要决定于副矿物的含量和成分，它们是磁铁矿、磁赤铁矿、赤铁矿，以及铁的氢氧化物；其造岩矿物如石英、长石、方解石等，对磁化率无贡献。

✓沉积岩多数只有微弱的磁性，故磁场平静、单调。有些砂岩、页岩或含有磁铁矿的大理岩，因含有少量磁铁矿物而出现磁异常。有的盐丘，因其组成矿物具有逆磁性而有数十纳特的负磁异常。

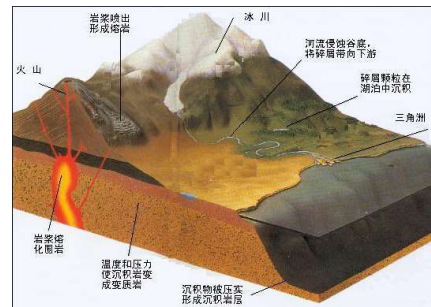


4. 岩石的磁性

■三大岩类的磁性

•火成岩的磁性

- ✓依据火成岩的产出状态，又可分为侵入岩和喷出岩。
- ✓侵入岩的不同岩石组(花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩、辉长岩、超基性岩等)，其 κ 平均值随岩石基性增强而增大。
- ✓超基性岩是火成岩中磁性最强的。超基性岩体在蛇纹石化时，辉石被分解形成蛇纹石和磁铁矿，使磁化率急剧增大，可达几个SI(κ)单位。
- ✓基性、中性岩，一般来说其磁性较超基性岩次之。
- ✓火成岩具有明显的天然剩余磁性，其 $Q=Mr/Mi$ 称作柯尼希斯贝格比。不同岩石组的Q值范围，可在0~10或更大范围变化。

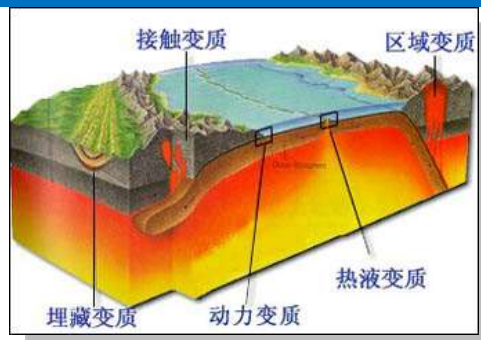


4. 岩石的磁性

■三大岩类的磁性

•变质岩的磁性

- ✓变质岩的磁化率和天然剩余磁化强度，其变化范围很大。变质岩磁性与原来的**基质**有关，也**与其生成条件**有关。
- ✓具有层状结构的变质岩，表现有**磁各向异性**。即沿不同方向的磁化率不相等。
- ✓由沉积岩变质生成的，称水成变质岩，其磁性特征一般具有铁磁-顺磁性。**沉积岩形成的变质岩一般磁性微弱，磁场平静。**
- ✓由岩浆岩变质生成的，称火成变质岩，其磁性有铁磁-顺磁性与铁磁性两组。由火山岩形成的变质岩异常与中酸性岩体异常相近。含铁石英岩情况特殊，往往形成有明显走向的**强磁异常**。



岩石类型	$K, 10^{-6} \text{SI}(K)$	$M_r \text{ A/m}$	岩石类型	$K, 10^{-6} \text{SI}(K)$	$M_r \text{ A/m}$
超基性岩	$10^1 - 10^3$	$10^{-1} - 10^1$	变质岩	$10^{-1} - 10^2$	$10^{-3} - 10^{-1}$
基性岩	$10^0 - 10^3$	$10^{-3} - 10^1$	沉积岩	$10^{-1} - 10^1$	$10^{-3} - 10^{-1}$
酸性岩	$10^0 - 10^2$	$10^{-3} - 10^1$			



露天铁矿



铁矿石



铁矿带



闪长岩



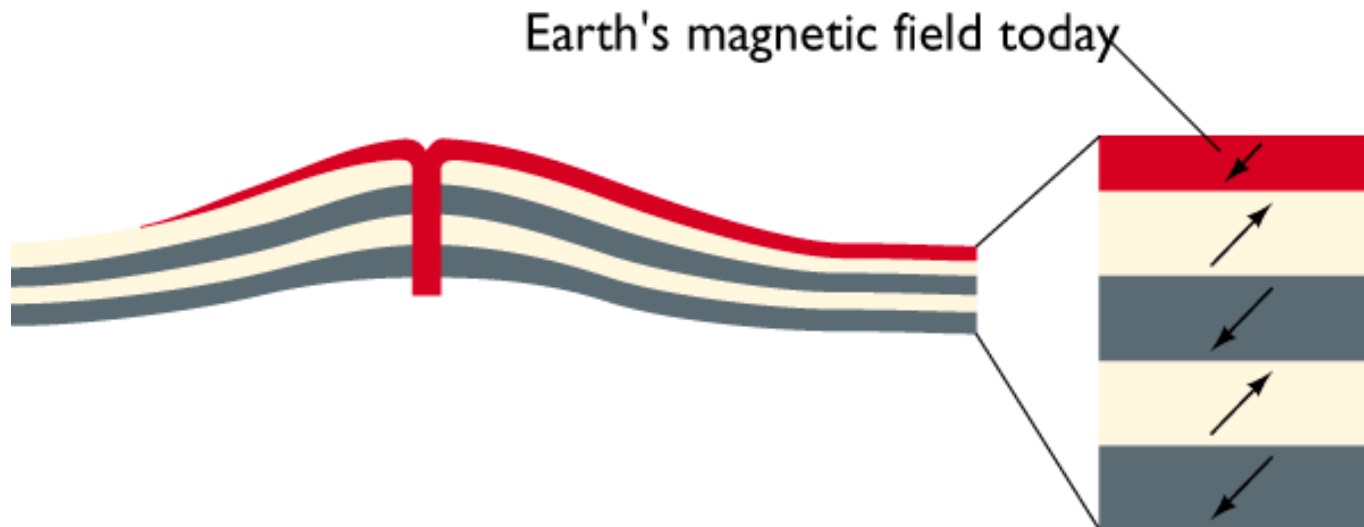
沉积岩



变质岩

4. 岩石的磁性

■ 岩石的剩余磁性

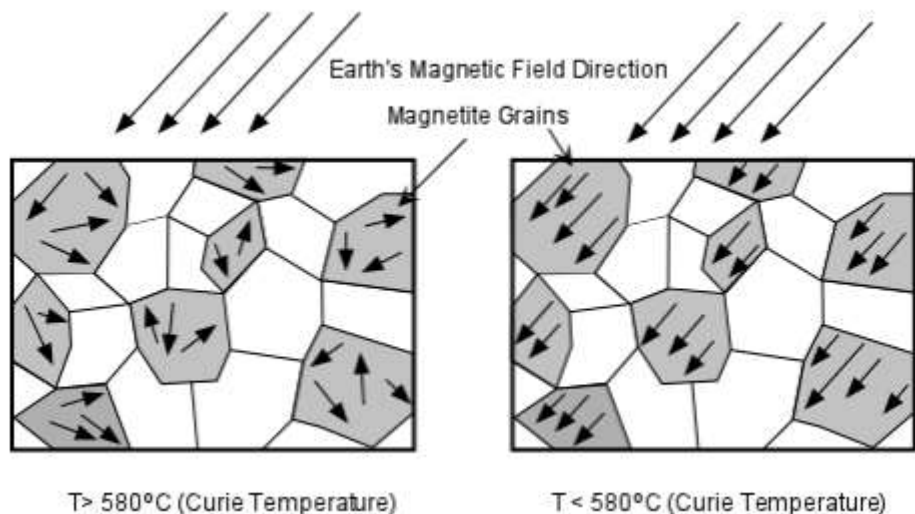
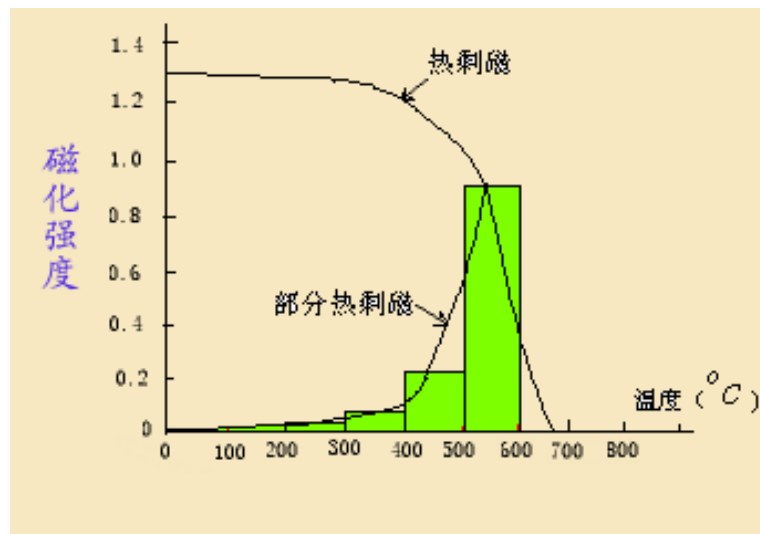


4. 岩石的磁性

■ 岩石的剩余磁性

• 热剩余磁性 (TRM)

- 在恒定磁场作用下，岩石从居里点以上温度逐渐冷却到居里点以下，在这个过程中受磁化所获得的剩磁。
- 强度大；稳定（磁性弛豫时间长）；总热剩磁是各部分热剩磁之和（叠加定律）；热退磁也服从叠加定律。



4. 岩石的磁性

■ 岩石的剩余磁性

• 碎屑剩余磁性 (DRM)

沉积物固积成岩后，按其碎屑的磁化方向保留下来的磁性。

- 强度正比于定向排列的磁性颗粒数目；比较稳定；强度小。

• 化学剩余磁性 (CRM)

在一定磁场中，某些物质在低于居里温度的条件下，经过相变和化学过程所获得的剩磁。

- 剩磁强度正比于外磁场；比较稳定；强度小。

4. 岩石的磁性

■ 岩石的剩余磁性

• 粘滞剩余磁性 (VRM)

岩石生成之后，长期处于地磁场作用下，原来走向排列磁畴弛豫到地磁场方向上，所形成的剩磁。

- 强度与时间的对数呈正比；随温度增高强度增大。

• 等温剩磁 (IRM)

- 在常温下，岩石受外部磁场作用（如闪电等）所获得的剩磁。
- 不稳定。

4. 岩石的磁性

■ 岩石的剩余磁性

原生剩磁

热剩磁 (TRM) 在恒定磁场作用下，岩石从居里点以上温度逐渐**冷却**到居里点以下，在通过居里温度时受磁化所获得的剩磁。

碎屑剩磁 (DRM) 沉积物固结成岩后，按其**碎屑**的磁化方向保留下来的磁性。

化学剩磁 (CRM) 在一定磁场中，某些物质在低于居里温度的条件下，经过**相变和化学过程**所获得的剩磁。

次生剩磁

粘滞剩磁 (VRM) 岩石生成之后，长期处于地磁场作用下，原来走向排列磁畴**弛豫**到地磁场方向上，所形成的剩磁。

等温剩磁 (IRM) 在常温下，岩石受**外部磁场**作用（如闪电等）所获得的剩磁。

4. 岩石的磁性

■ 岩石的剩余磁性

• 火成岩剩磁成因

热剩磁是形成火成岩原生剩磁的原因。

• 沉积岩剩磁成因

沉积岩剩磁是通过沉积作用和成岩作用两个过程形成的，因而是碎屑剩磁和化学剩磁。

• 变质岩剩磁成因

变质岩的剩磁与其原岩有关，由火成岩变质生成的正变质岩，它可能有热剩磁。由沉积岩变质生成的副正变质岩，它可能有碎屑剩磁和化学剩磁。

粘滞剩磁和等温剩磁都有可能参与岩石的形成

小节

- 地磁要素及其分布规律
- 地磁场的组成
- 表征磁性物理量
- 物质磁性
- 岩石剩余磁性



课后测验

- 磁化强度
- 影响岩石磁性的因素
- 地球磁场的构成
- 剩磁的类型



课程结束

陈涛

