

测井资料地质分析

〔美〕S. J. 皮尔森 著

石油工业出版社

測井資料地質分析

王德成 主編

石油工業出版社

测井资料地质分析

5427/09

[美] S. J. 皮尔森 著

石油工业部石油勘探开发科学研究院情报室译

石油工业出版社

本书共分十章。主要介绍氧化还原状态测井方法的基本原理及曲线解释；根据测井资料研究沉积岩、沉积岩相、地质构造以及水文地质等。书中在水文地质方面着重对压实作用的水动力学、大地静力平衡以及渗透水动力学等进行了较详细的论述。

S. J. Pirson

GEOLOGIC WELL LOG ANALYSIS

Gulf Publishing Company Houston, Texas

(1970年)

测井资料地质分析

(美) S. J. 皮尔森著

石油工业部石油勘探开发科学研究院情报室译

(据根原石油化学工业出版社纸型重印)

石油工业出版社出版

(北京安定门外大街东后街甲 36 号)

北京顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 32 开本 9¹/₂ 印张 209 千字 印 1—3,000

1982 年 12 月北京新 1 版 1982 年 12 月北京第 1 次印刷

书号: 15037·2387

定价: 0.76 元

目 录

第一章 作为氧化还原状态测井的SP和Eh曲线	1
第1节 氧化还原或Eh电位	2
第2节 氧化还原电位测量对勘探油、气田及其它矿 藏的意义	6
第3节 氧化还原电位测井解释的基本原理	11
第4节 氧化还原电位测井在油、气勘探中的前景	27
第5节 制图问题1（绘制生油层及其区域排油程度图）	29
结 论	32
第二章 用测井曲线形状研究沉积学	33
第1节 海退沉积型式	34
第2节 海进沉积型式	39
第3节 岸外砂坝	42
第4节 河道充填砂坝	44
第5节 浊流岩	46
第6节 三角洲沉积层序	46
第7节 绘制沉积环境图	50
第8节 制图问题2（利用海退曲线型式在侧向上投影 砂层的尖灭线）	51
第三章 地层圈闭的勘探	55
第1节 测井曲线上可认出的地质特征	56
第2节 勘探方法	57
第3节 常见地层圈闭的特征	61
第4节 制图问题3（编绘选择性等厚图）	72

第四章	作为构造地质研究工具的连续地层倾角测量	79
第1节	测量原理	80
第2节	地层倾角测量仪的型式	81
第3节	连续地层倾角测量仪的特点	88
第4节	不精确、误差和降低质量的原因	88
第5节	地层倾角测量的对比和计算方法	90
第6节	地层倾角测量的应用	97
结 论		113
第五章	连续地层倾角测量作为研究沉积岩的工具	114
第1节	沉积岩的组构	114
第2节	岩石物理性质	118
第3节	确定电阻率异向性程度和定向	125
第4节	用普通的高密度地层倾角测量成果研究方向 性沉积作用的趋向	133
第5节	方位角频率图	135
第6节	改进了的施密特图解	137
第7节	制图问题4(用连续地层倾角测量成果作为研 究沉积作用的工具)	138
第六章	古岩相测井和制图	143
第1节	礁块岩性	143
第2节	岩相地层圈闭	145
第3节	三种孔隙度测井曲线	149
第4节	计算机应用于岩性测井的具体实例	156
第5节	其它古岩相制图方法	164
第6节	应用实例	167
第七章	裂缝强度测井和制图	168
第1节	断层的识别	169
第2节	浊流沉积和滑动块体的测井曲线特征	172
第3节	探测地下断层	175

第4节	裂缝强度测绘	176
第5节	裂缝强度指数 (FII)	177
第6节	断层靠近指数 (FPI)	183
第7节	裂缝密度指数 (FDI)	183
第8节	应用实例	189
第八章	水文地质学第一部分: 压实作用的水动力学	191
第1节	地球化学异常的成因	192
第2节	放射性异常	195
第3节	烃类漏失	216
第4节	压实作用流体动力学形成的石油圈闭	223
第5节	放射性测井图的绘制	224
第九章	水文地质学第二部分: 大地静力平衡	229
第1节	地层压力	230
第2节	压实作用和流体的关系	230
第3节	电阻率效应	232
第4节	页岩压实效应	234
第5节	估算地层压力的测井方法	236
第6节	应用实例	244
第7节	应用实例	250
第8节	异常压力在地质上的重要性	252
第十章	水文地质学第三部分: 渗滤水动力学	256
第1节	水驱动力	256
第2节	水动力位能的测井方法	259
第3节	勾绘水动力圈闭	260
第4节	编制水动力圈闭图的方法	263
第5节	寻找油-水接触面的投影方法	267
第6节	需要的测井组合	274
第7节	制图问题 5 (油-水接触面的投影)	275
第8节	水动力冲洗	281

第9节	用测井曲线确定淡水冲洗	287
第10节	制图问题6(水动力冲洗)	288
第11节	薄泥质砂层中的水-渗透现象研究	290
第12节	制图问题7(水-渗透石油圈闭)	296

第一章 作为氧化还原状态

测井的SP和Eh曲线

随着电测井的诞生，SP曲线是第一个可以应用的岩性测井曲线。但是，人们对于它的解释和意义至今还没有充分了解。把SP曲线看作是沉积作用曲线只是最近的事，这是有重要意义的，因为SP曲线就是一条被压抑了的氧化还原电位曲线。

氧化还原测井连续地测量充满水基泥浆（淡水或盐水泥浆）的井筒中相邻地层的还原和氧化作用（redox或Eh）电位。在同一井深上的两个电极（一个惰性的铂电极；一个参考的铅极）之间进行的这种简单的电位测量，指示了存在于每个地层中的各种氧化和还原矿物以及地层水中各种离子的比例。在沉积物中，这种电位取决于沉积物的沉积环境（陆棚上的深海到浅海，沿沉积海岸线的滨海和亚滨海）；不管波浪的簸扬作用是属高能环境还是低能环境，也不管这个环境是否被雨水、油、气、硫化氢等在运移和聚集时所改造。

许多证据表明，氧化还原电位是电测井记录的SP曲线的一个重要组成部分。

地球上具有经济价值的矿物富集都和一定的地球化学环境条件有关。决定一种环境的许多地球物理化学参数，在一种介质中，即使是在一种地质介质中，也不可能同时有效地全部测量出来。有那么一些参数是专属于液相的岩石孔隙流体的。它们仅仅与溶液中的某些控制原地发生的化学反应有重

大意义的元素有关，特别是与控制反应平衡有重大意义的元素有关。

岩石孔隙流体内各种重要离子的活度 activity (浓度)，决定了地球化学环境。我们用一种代表孔隙流体中（以及孔隙空间中的流体-固体接触面上）电子和质子迁移趋势 (transfer tendency) 的诺斯特 (Nernst) 电位，来表示地壳中居于优势的地球化学环境下达到平衡的化学反应的决定性因素。这样一种环境，在某些地质时期可能是比较固定和均一的，并可能持续到现在。我们的主要兴趣是放在岩石生成时期，以及后来沉积盆地中相对低压和接近地表温度下发生的地球化学反应。因此，我们关心的主要是沉积地球化学反应和平衡。

第1节 氧化还原或Eh电位

在生物的发育和腐烂过程中以及在固体矿物系统中，氧化还原反应是不可缺少的。但是，生命的过程是许多连续的氧化还原反应。

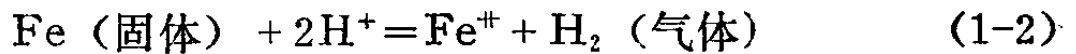
氧化还原电位 (ORP, redox电位或Eh) 度量了离子溶液中化学上的各类离子在改变它们的氧化或还原状态的趋势。它也定量地度量一个可逆氧化还原系统的氧化能量和电子逃逸趋势 (electron escaping tendency)。

牵连到电子和质子（亦即电荷）迁移的化学反应取决于 pH 值（质子活度的尺度）或 Eh 值（电子活度尺度）；或者取决于发生反应的系统中的 pH 和 Eh 值。下列通式控制着在平衡和在标准条件下的这些反应：

$$Eh = E_o' - 60 \times \frac{a}{n} \times pH \quad (1-1)$$

式中“a”是反应中的质子数(H^+),“n”是反应中的电子数(e^-)。因之平衡条件在Eh对pH的笛卡尔坐标图上用一直线来代表,其斜率为 $60a/n$ 。上述平衡反应控制了三种化学反应:

1. 在涉及质子的地方,如在这种氧化反应中:



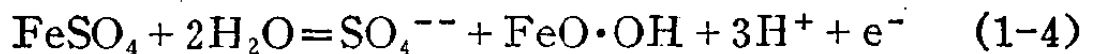
(这个反应只决定于pH值。例如 H_2SO_4 , H_2S , H_2CO_3 , HCl 和 H_3PO_4 等酸类作用于金属上)。

2. 在涉及到电子的地方:



(这是只决定于Eh的反应。以金属离子化和金属离子从低价变到高价氧化作用为例)。

3. 在牵涉到质子和电子的地方:



(这个反应决定于Eh和pH值。自然环境中的大多数反应都与此相类似)。

总之,还原作用总是等于被还原物质所净得的电子数。

因此,一个氧化还原反应牵涉到电子的迁移或者迁移电子的趋势。这个趋势是用接在一个参考电极(它供应迁移电子的驱动电势)和一个惰性电极(它接受电子)铂(Pt)或金(Au)之间的一个简电位测量线路或者高阻毫伏计来测量的。可测量它们之间建立的电动势。

参考电极常常被人称作氢电极。因此,Eh代表氧化还原电位。但在实际上,氢电极是笨重和不实用的。实验室和野外现场工作,在 $25^\circ C$ 和1大气压的标准条件下,是用甘汞电极作为参考电极, $E_{\text{甘汞}} = -245$ 毫伏。

压力补偿甘汞电极可以在井内使用。但是更可取的是金

属电极，如果它们在测井条件下是稳定的、不发生污染和氧化状态的变化（即对所用的泥浆来说）。铅电极是满足要求的，而铁电极则不行。

在一特定泥浆中的一个金属参考电极，只要知道了它在不同温度和压力下相对于甘汞电极或氢电极的性能，就可以在氧化还原测井图上画出一条零线。这就第一次能够从一条有效零线中读出SP型的测井图来。在井场测井条件下，利用把测井电极浸到一已知氧化还原电位的溶液中的办法，可以确定这条零线，例如佐贝尔溶液 $E_h = 0.428$ 伏（25℃条件下）。

下式表示在不同的氧化和还原状态下，含有各类离子的溶液中测得的氧化还原电位：

$$E_h = E_c + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Ox]}{[Red]} \quad (1-5)$$

式中 E_h 是相距很近、浸在含有不同元素和化合物的氧化的 $[Ox]$ 和还原的 $[Red]$ 离子化溶液中的一对电极所显示的氧化还原电位。它指的是人为规定为电位零值的标准氢电极的电位值。

E_o 是把 E_h 值折合成氢电极所需要的标准电位。式中其他符号涵义如下：

R ——气体常数，8.315焦耳；

T ——绝对温度，°K；

n ——反应中涉及的电子数；

F ——96490库仑。

一个溶液的氧化还原电位只决定于比值 (Ox/Red) ，而添加离子化中性盐类，如 $NaCl$ ，对它没有影响。因此，少量地层水和井内泥浆相混，即使是盐水泥浆，也会给出同样的 E_h 电位，就象没有被稀释或没有被污染一样。这就能第一

次在盐水泥浆中测出和SP相似的一条曲线。

测量地层的氧化还原电位，泥浆和地层水不需要成分相同。然而，在所有井深上，泥浆和地层内的 (Ox/Red) 比值必须一样。这是在泥浆停止循环后一段合理的时间达到的，因为为了这种平衡的需要，井和地层内的 SP 电流迅速地传递离子电荷。

当把一个惰性电极（铂或金的）浸没在一种可逆的氧化还原系统中时，在这个电极上建立起一个电位差。取一合适的电位计连到插在这个系统中的一个参考电极上，很容易量出这个电位。惰性电极当其浸入到系统中时，并不参与任何反应，但是可以起触媒作用。它只是从这个系统中导出和输入电子。惰性电极可以看作是一个可变浓度的电子容器——其电位随电子浓度而变化。由于电极和氧化还原系统中的电子逃逸趋势不同，所以在Eh电极上建立起一个电位差。

Eh 是测量系统中电子逃逸趋势的强度 (intensity level)，而不是容量 (capacity)。在这方面，Eh和温度及pH相似，它们也是强度参数。它们各自都给不出有关一个系统的热容量或者缓冲容量 (buffering capacity) 的数据。因此，一个系统的Eh值取决于氧化-还原比，和它们的绝对数量以及这些数量可能变化的难易无关。氧化还原系统的保持平衡容量 (poising capacity) 是度量抗拒有关反应物中变化的阻力。例如，一个氧化系统的Eh值可以是相同的，而不管它含有1%还是10%的氧化剂。然而，对抗变化的阻力（即保持稳定的容量）在后者中大十倍。天然环境可以具有明确的Eh电位，但是却不够平稳，在这种情况下，很难得到稳定的氧化还原测量。总之，所有的氧化反应都从被氧化的物质中移走电子。由于一个系统在电性上必须保持中性，

所以每个氧化作用必然伴随一个获得电子的还原作用。因此,所有的氧化-还原反应,本质上都是由同一系统或环境中的氧化剂和还原剂之间的电子的平衡交换组成的。没有相应的氧化剂去获取被释放的电子,氧化作用就不能继续进行。氧化剂能够获取电子,而还原剂能够失去电子。要测量一个系统的还原或氧化能力的强度,必须测量电子逃逸趋势或者电荷的电子迁移趋势。因此,测量电位差就能从事氧化还原过程的定量研究。

一种环境的电子逃逸趋势特性用一惰性电极的 E_h 电位以及pH质子逃逸趋势来表示,后者也是一项重要的环境特征。

第2节 氧化还原电位测量对勘探 油、气田及其它矿藏的意义

氧化还原测量在勘探油、气田和其它矿藏方面是很重要的,因为它们测量了沉积物成岩作用时期起作用的物理化学因素。沉积物中的内部变化从它们沉积出来就发生了,并持续到现在。下面是根据达浦斯划分的成岩期:

1. 早期或氧化还原状态成岩期^①: 海水中氧的作用特别活跃,并涉及大多数铁的化合物。因此,在这个期间,沉积物的颜色改变了。

2. 晚期或者石化成岩期^② 以及深成成岩期^③: 因为电

① 原文为redoxomorphic stage: 据达浦斯,此期以未固结的沉积物中发生的可逆氧化还原作用为特点,或译为氧化还原状态期。

② 原文为locomorphic stage: 此期以石化成岩及交代作用为主,或译石化期。

③ 原文为Phylomorphic stage: 以形成自生矿物为特点,或译深成期。

化学平衡的变迁，发生了沉积物胶结作用。矿物的置换作用也是个活跃过程。

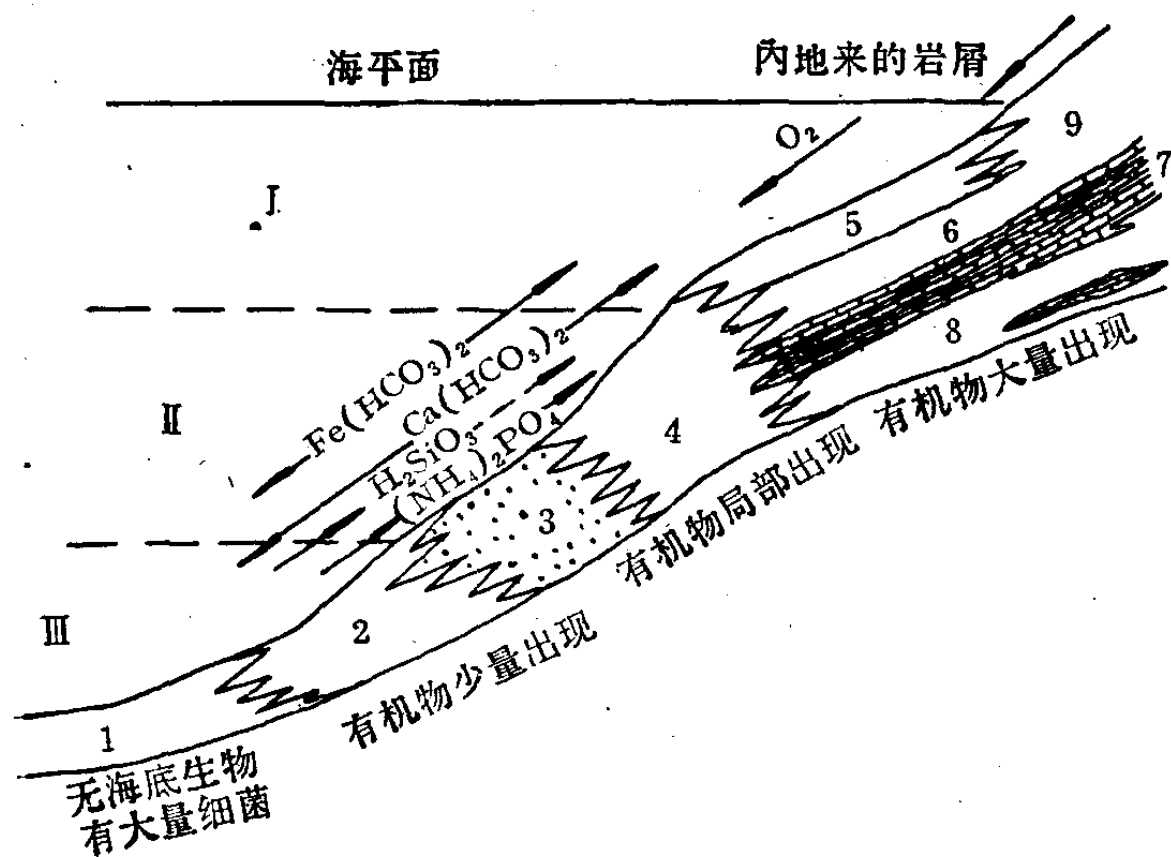


图 1-1 与碳酸盐岩沉积有关的物理化学分带图解
(石灰岩相通过所有环境从海岸到盆地延伸)

1—黄铁矿-泥质-泥灰岩和浊流沉积；2—燧石；3—鲕绿泥石；4—菱铁矿；5—褐铁矿鲕石；6—海绿石砂层；7—石灰岩；8—褐铁矿砂层和石灰岩；9—褐铁矿质砂层

I— O_2 带 $pH: 7.2 \sim 8.5$ $Eh: -0.05 \sim +0.4$ 最活泼的介质: $O_2, CO_2, Cl^-, SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, HCO_3^-, NO_3^-$

II— CO_2 带 $pH: 6 \sim 7.5$ $Eh: +0.05 \sim -0.2$ 最活泼的介质: $HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, PO_4^{3-}, NO_2^-$

III— H_2S 带 $pH: 7.2 \sim 9$ $Eh: -0.2 \sim -0.5$ 最活泼的介质: $H_2S, C_xH_yO_z, C_xH_y, NH_4OH$

3. 现阶段或后生成岩期：由于来自矿胎的各种元素的淋滤作用，伴随着在有利物理化学环境中的搬运和再沉淀，发生了浅处的矿化作用。这个过程在铀、钒、锰、铁、铜等沉积矿床的成因上特别重要。

某些恰当的引证说明了这些成岩过程：

据拉尔森 (Larsen) 和齐林格 (Chilingar) 认为：“成岩转变作用可能是沉积物对其物理化学环境反应的综合特征，其中最重要的因素是环境的 pH 和 Eh 的结合、离子浓度、温度和压力。”

据阿姆斯特茨 (Amstutz) 等人的意见：“如果沉积矿床没有遭受现代或古代的风化作用，则成岩时期建立起来的化学特点可以保持一个很长的时间。”他还说：“成岩的环境是由两个相组成的，一个固相或碎屑相，它的成分受到不同

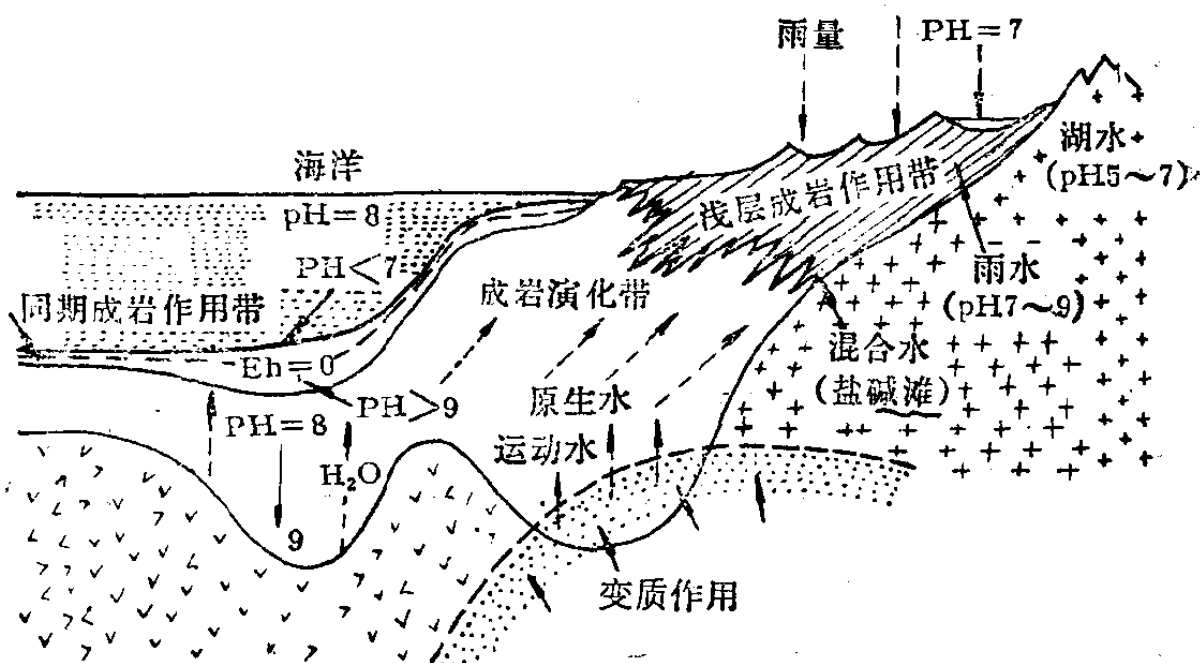


图 1-2 通过大陆边缘的理想剖面

表示同期海相沉积作用和三个成岩作用相带的位置：(1) 沉积同期成岩作用时期的扩散电位；(2) 成岩进行期中液体向上运动；(3) 后生成岩期中的向下运动

程度的氧化（最重要的是铁），和一个含在孔隙空间中的液相，它（原来）实际上往往就是海水。后者的主要特点是它的盐类、它在溶液或悬浮物中的有机物、活着的生物和溶解的氧气。由于消耗氧的结果，环境逐渐变得更加还原，这种作用常常伴随着通过短暂的酸化作用而在pH值上有显著的变化。”

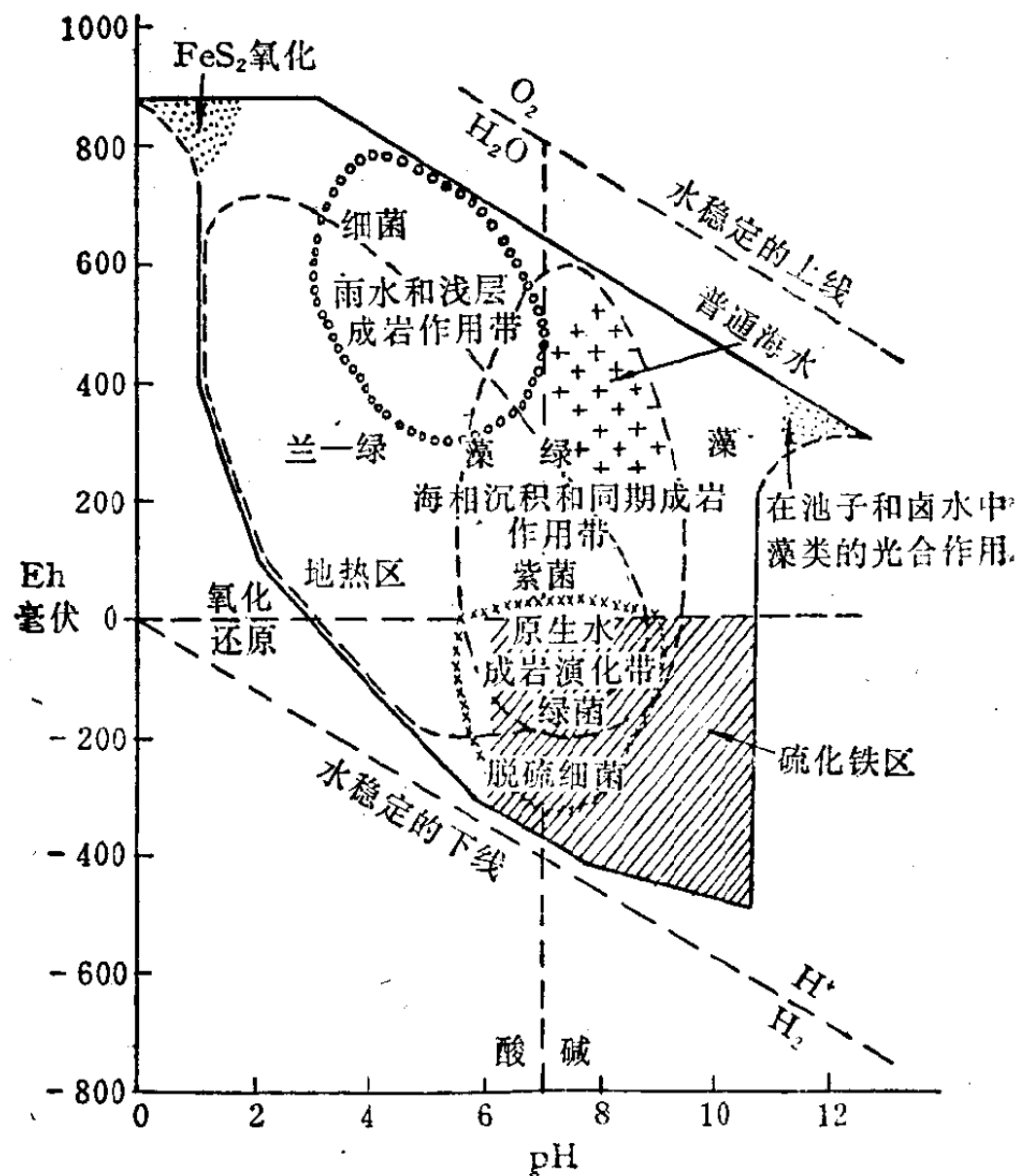


图 1-3 链线图

以pH和Eh值说明自然环境的限制范围，特别是沉积同期、成岩进行期和后生成岩期的位置