



第五节 粘土岩（泥质岩）

Clayrocks (mudstones)



景德镇窑青花花果纹黄彩瓷盘
(明弘治年间)



青花瓷餐具



新石器时代桶形彩绘陶罐
(内蒙古出土)



钧窑三足瓷洗
(北宋)



紫砂茶叶罐 (清乾隆年间)



一、基本概念

粘土岩——以**粘土矿物**为主（含量**>50%**）的沉积岩。

粘土——疏松或未固结成岩的粘土矿物沉积物，粒径**<0.005mm**（**0.0039**或**0.01mm**）。

泥质岩——主要是由**粘土矿物**及粒径**<0.0039mm**的**细碎屑**（**>50%**）组成的沉积岩。



粘土岩的主要组分——粘土矿物大多数来自母岩风化的产物，并以悬浮方式搬运至水盆地，以机械沉积的方式而成。所以粘土岩应归属陆源碎屑沉积岩。

粘土岩是沉积岩中分布最广的一类岩石，约占沉积岩总量的60%（也有人认为55%）。

粘土岩是主要的生油岩和良好的盖层，同时亦具有其它广泛的工业使用价值。



二、粘土岩的主要物理特性

1. 非渗透性

石油及天然气在地下保存的良好盖层

2. 吸附性

粘土矿物具有从周围介质中吸附各种离子、放射性元素及有机色素的能力。

自然伽马测井 (U^{4+} , Th^{4+} , K^{+})



3. 吸水膨胀性

蒙脱石吸水膨胀8 ~ 10倍

改善钻井液性能（调节粘度）

利用中子伽马测井解释岩性

“水敏”——堵塞孔隙喉道

4. 可塑性

水调和后造形，撤外力形不变



5. 耐火性



6. 烧结性

粘土矿物在低于耐火度的低温下局部熔化，因而使质点相互粘结成坚硬的瓷质石块。

粘土熔融（从局部熔化至全部熔化成流体的温度范围）范围越大，工业价值越高。



7. 粘结性（结合性能）

指粘土能与瘠性材料（掺入砂质）粘合，塑造出良好的泥坯，干燥后坚实的性能。

8. 干缩性

指粘土沉积物风干或加热烧干后，由于质点表面结合水分的蒸发，而产生的体积收缩的现象。

对于工业原料来说，是一种不利的性质。



三、粘土岩的物质成分

矿物成分以粘土矿物为主，次为陆源碎屑矿物、化学沉积的非粘土矿物及有机质。

化学成分以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 H_2O 为主，次为Fe、Mg、Ca、Na、K的氧化物及一些微量元素。

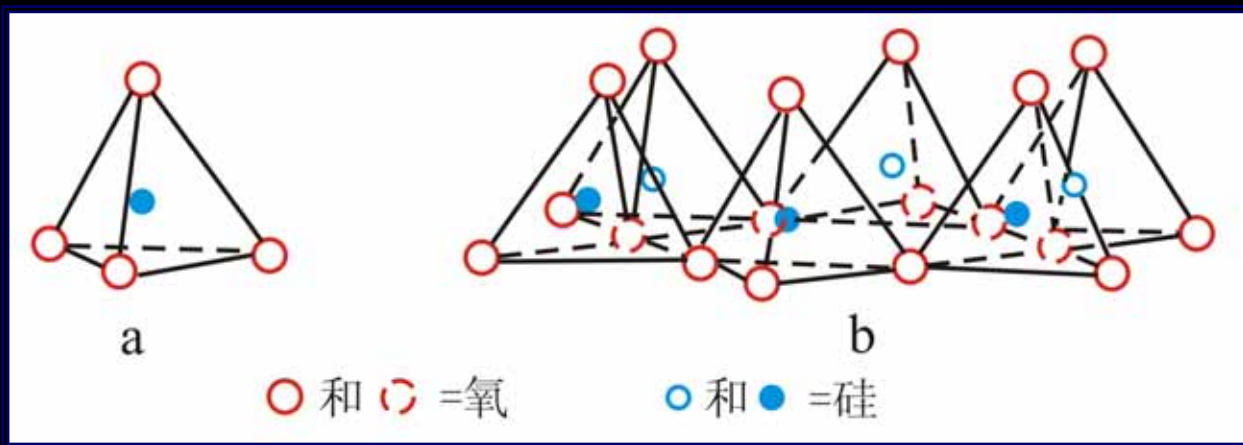


(一) 粘土矿物 (Clay minerals)

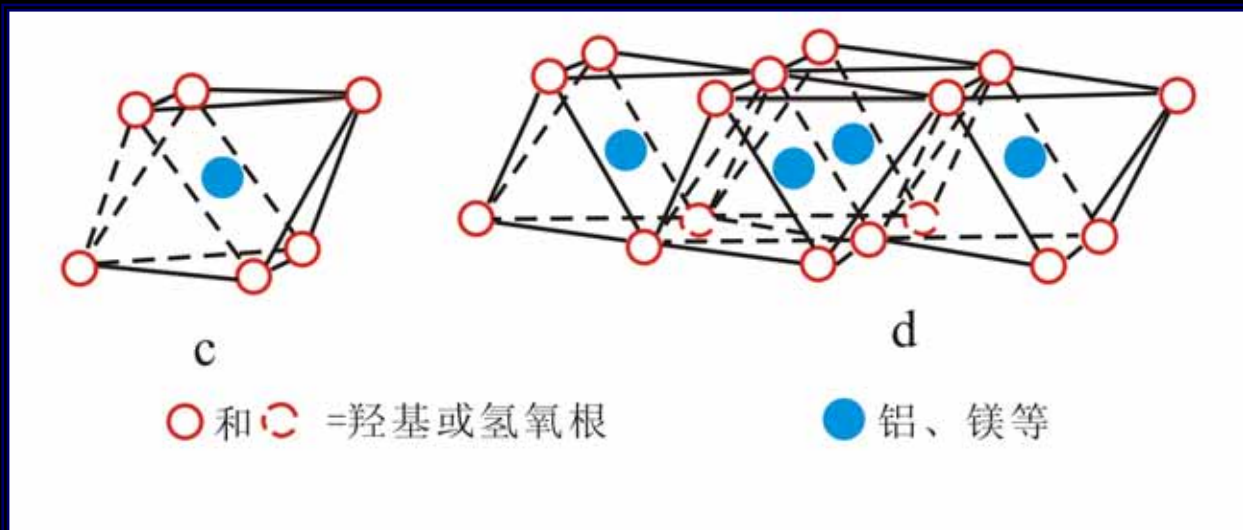
粘土矿物是一种含水的**硅酸盐**或**铝硅酸盐**，可分为非晶质和结晶质两类。

1. 粘土矿物的结构

粘土矿物的结构由两种基本结构层构成：**硅氧四面体层**和**铝氧八面体层**或**铁氧八面体层**。



硅氧四面体由一个硅与四个氧组成。



铝氧八面体层主要由铝与氧或氢氧离子的八面体配位构成的。



当八面体层中心由三价的阳离子（ Al^{3+} 、 Fe^{3+} ）充填时，则所有的八面体的中心，只有三分之二被充填，必定有一个空位置，称**二八面体型结构**（水铝矿层 $Al-OH$ ）。

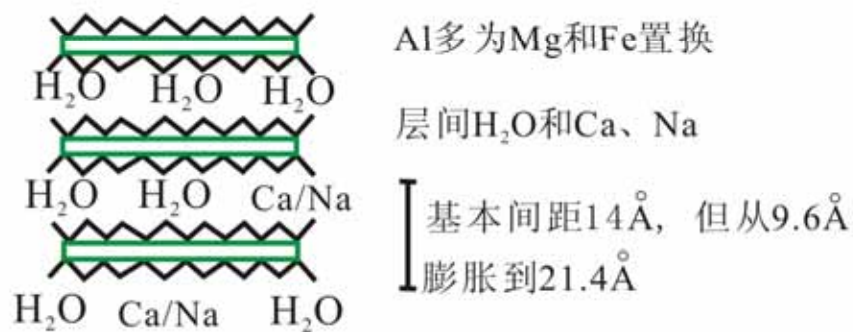
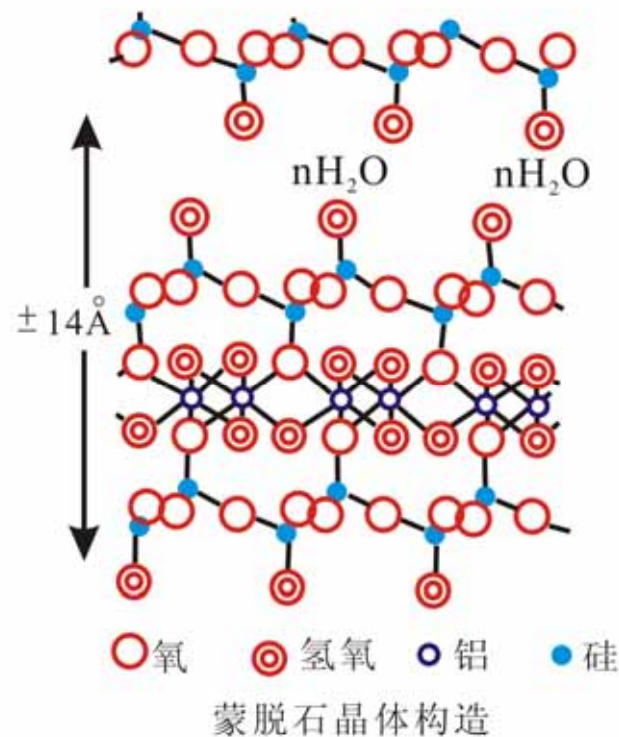
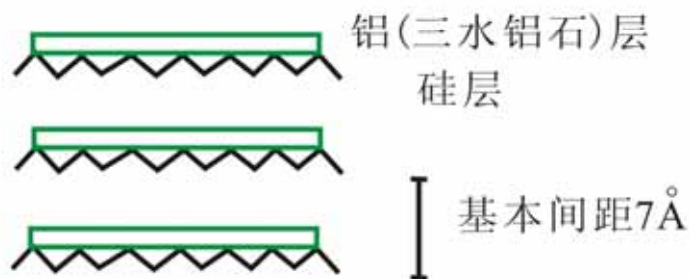
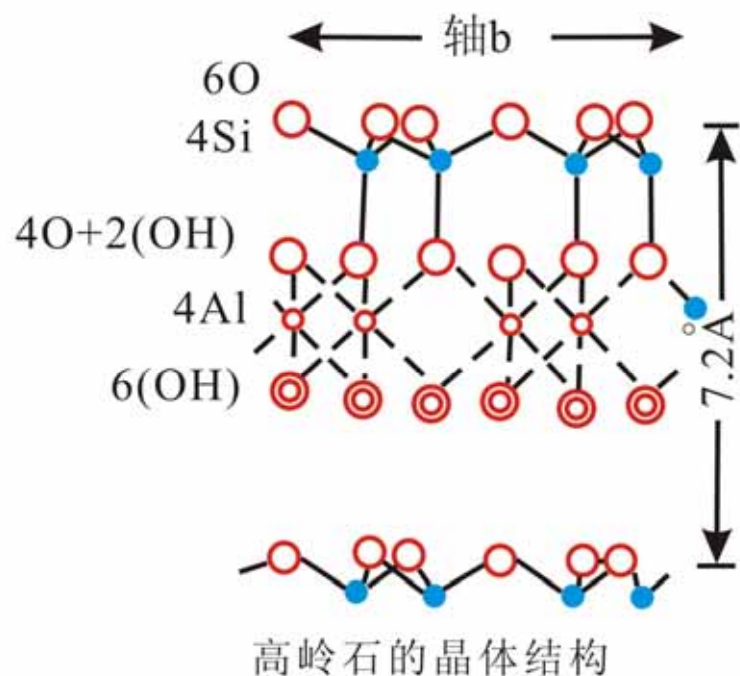
当八面体层中心由二价的阳离子占据时，则所有的八面体的中心全部被充填，称**三八面体型结构**（水镁石层 $Mg-OH$ ）。

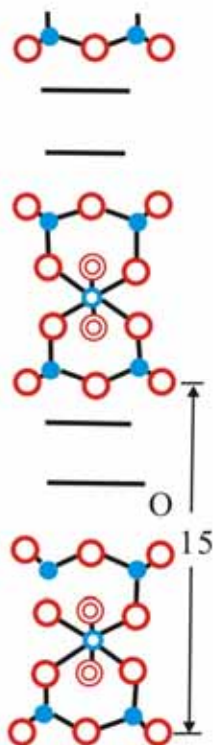


粘土矿物的结构单位层有两种类型：

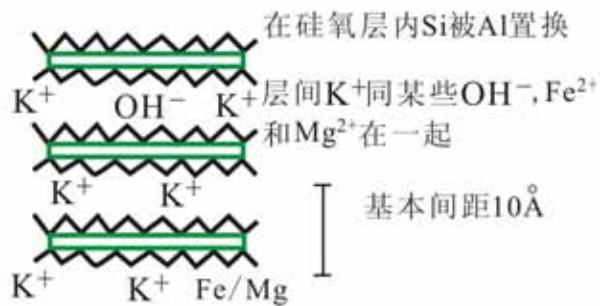
高岭石型：属双层型的结构单位层（1:1型），由一个八面体层连接一个四面体层组成。

蒙脱石型：属三层型的结构单位层（2:1型），由两层四面体夹一层八面体组成，伊利石和绿泥石也属三层型。

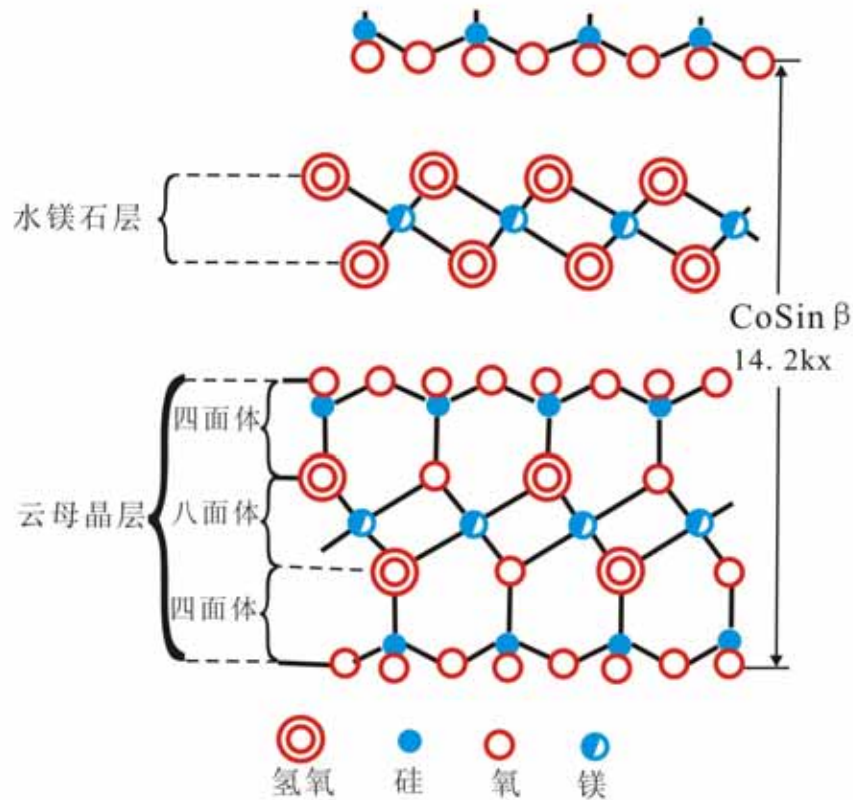




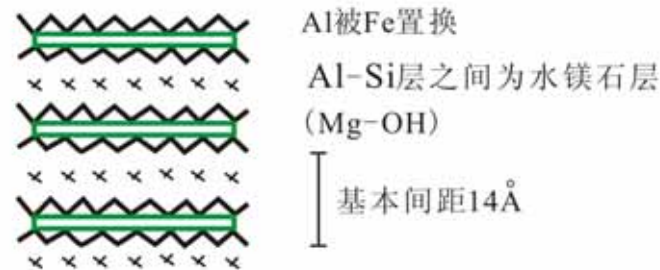
水云母晶体构造 (图中横线表示水分子层)



水云母晶体构造简化示意图



绿泥石晶体构造



绿泥石晶体构造简化示意图



除了以上四种常见的粘土矿物外，还有不少的**混层粘土**，它是由两种以上的粘土矿物的结构单位层在c轴方向交互叠置构成的。

若两种以上粘土矿物结构单位层作有规律的互层叠置，则称**有序混层**；否则称为**无序混层**，如伊-蒙混层、绿-蒙混层、伊-绿混层等。



粘土矿物分类简表

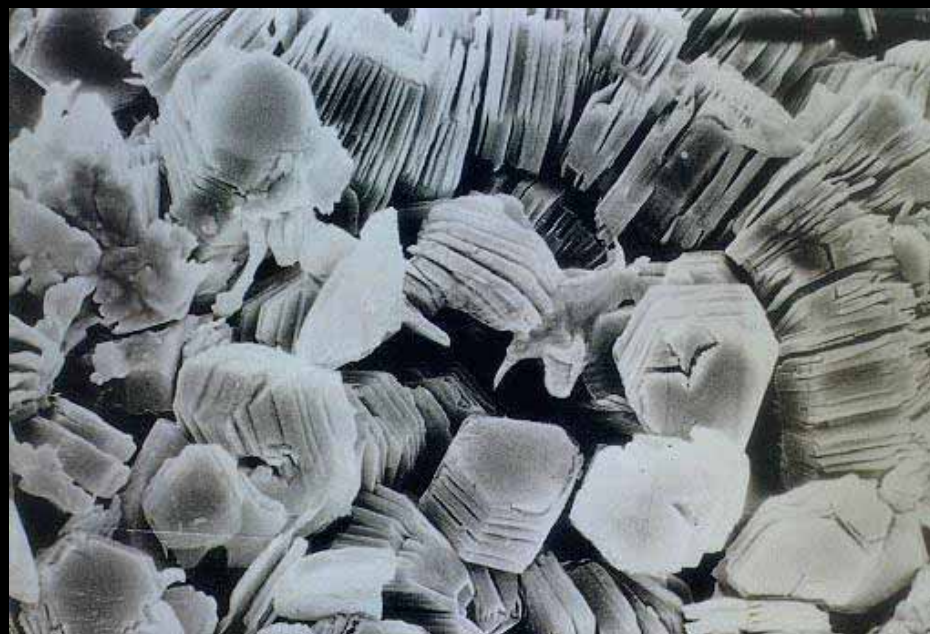
		结构单元层类型	层间物	族	种
晶质的	层状的	1:1 [Si ₄ O ₁₀] (OH) ₈	有或无水分子	高岭石	高岭石、地开石、珍珠陶土等
				埃洛石	埃洛石(多水高岭石)、变埃洛石等
		2:1 [S ₄ O ₁₀] (OH) ₂	阳离子或 水化阳离子	蒙脱石	蒙脱石、拜来石、绿脱石、皂石
				水云母	水云母(伊利石)、海绿石
		2:1:1 [Si ₄ O ₁₀] (OH) ₂	氢氧化物	绿泥石	各种绿泥石、单热石等
	混层状的	有序混层	水云母—蒙脱石组合、绿泥石—蒙脱石组合等		
		无序混层	水云母—蒙脱石组合、水云母—绿泥石组合 水云母—蒙脱石—绿泥石组合等		
	链层状的	2:1	水化阳离子	海泡石	海泡石、坡缕石(凹凸棒石)
半晶质和非晶质的			伊毛缟石、水铝英石等		

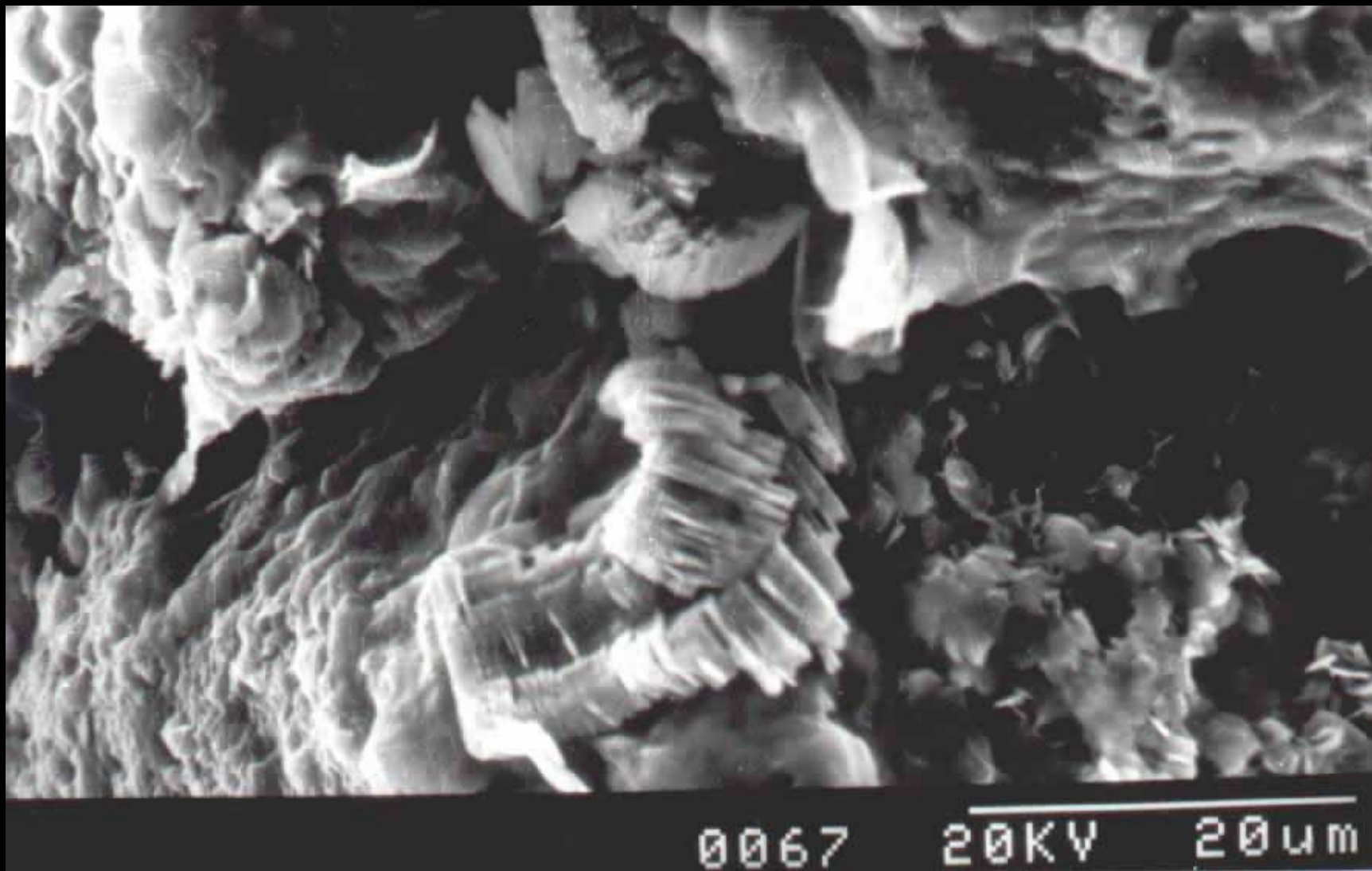


2. 粘土矿物的类型

(1) 高岭石族

高岭石、地开石、
珍珠陶土，其化学式
为 $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$
或 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$





自生高岭石充填孔隙



自生高岭石集合体充填孔隙

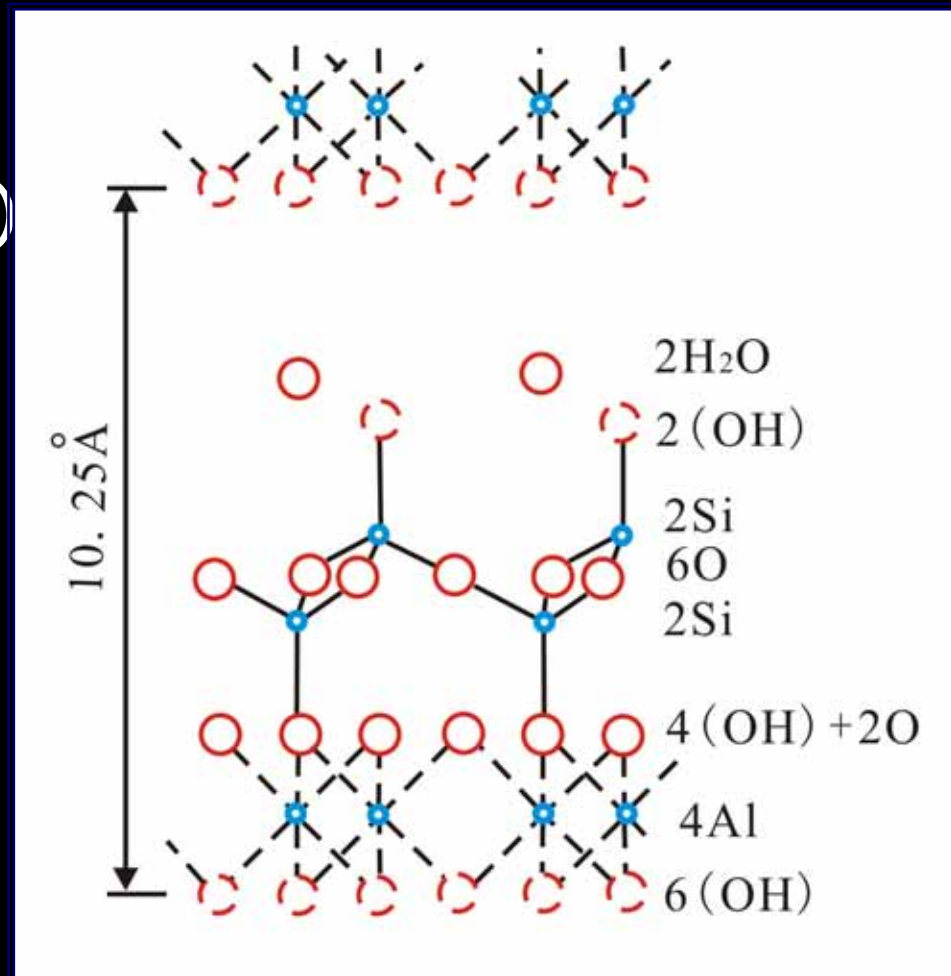


(2) 埃洛石 (多水高岭石) 族

● 埃洛石 (多水高岭石)



● 变埃洛石



埃洛石的晶体结构
(沿a轴投影)



(3) 蒙脱石族

蒙脱石、拜来石、绿脱石、皂石等



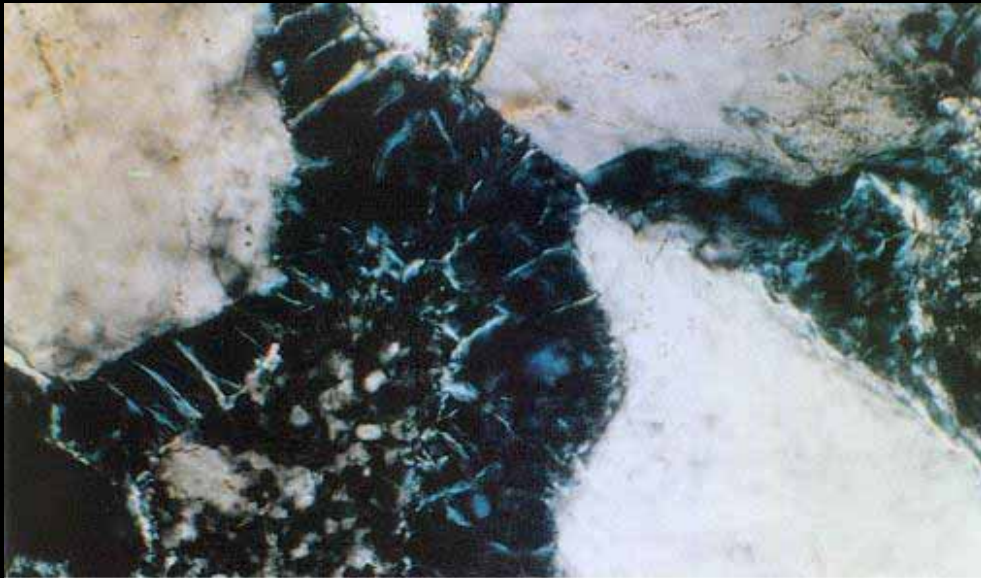


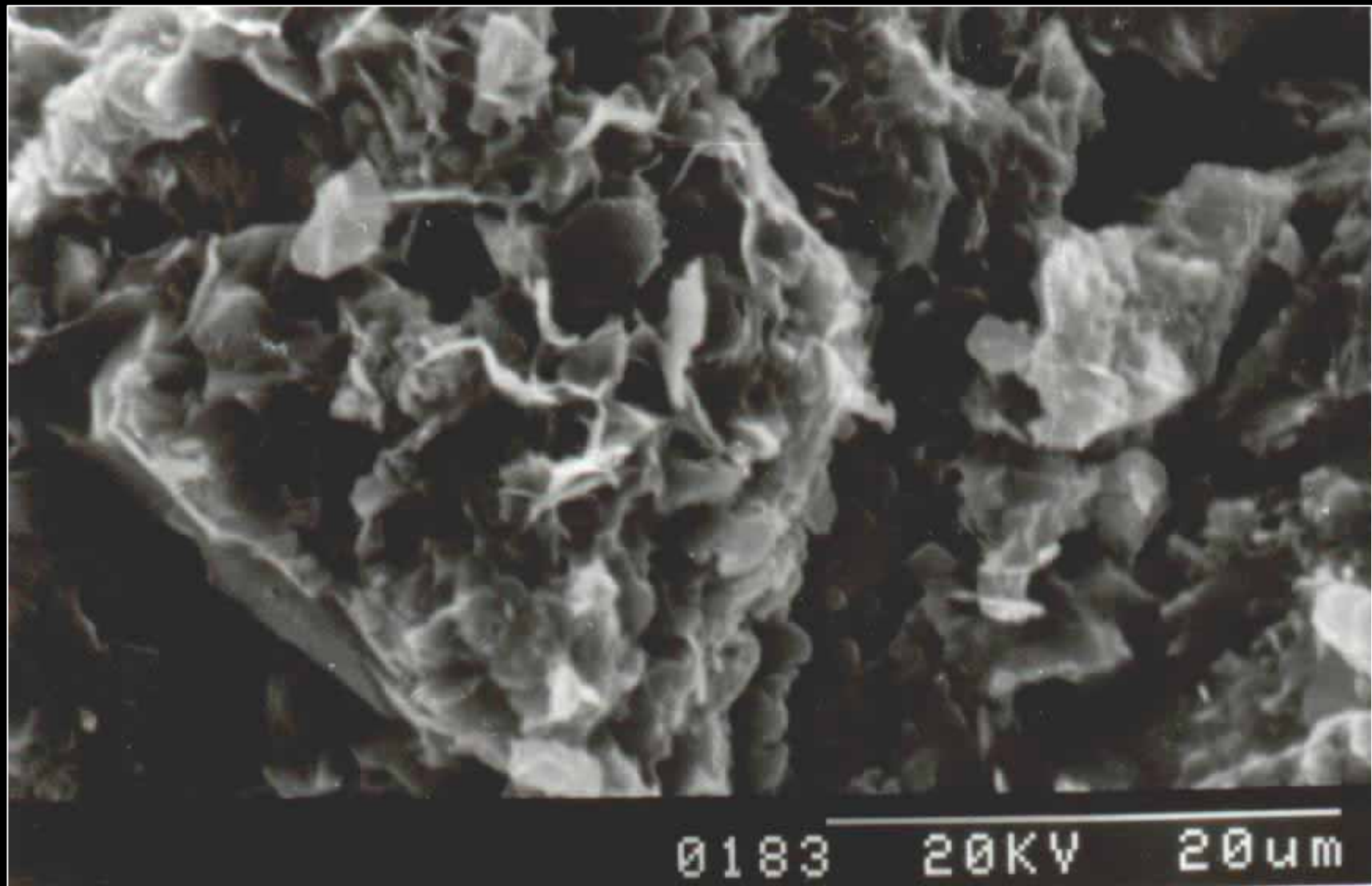
(4) 水云母族

●伊利石（水云母）



●海绿石





砂岩中粒表和孔隙充填的伊利石，呈叶片-丝缕状。

(5) 绿泥石族

- 正绿泥石 $(\text{Mg}, \text{Fe})_p [(\text{Al}, \text{Fe})_p \text{Si}_{4-p} \text{O}_{10}] (\text{OH})_8$
- 鳞绿泥石





(6) 海泡石族

海泡石 (sepiolite)、坡缕石等

层状结构硅酸盐矿物。

成分为 $\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 。

斜方晶系。

世界最主要产地为土耳其的埃斯基谢希尔。中国产地有江西乐平、湖南浏阳等。



(二) 非粘土矿物 (Non-Clay minerals)

1. 陆源碎屑矿物

石英、长石、云母、各种副矿物。

2. 化学沉积的自生矿物

主要有Fe、Mn、Al的氧化物和氢氧化物、含水氧化硅、碳酸盐、硫酸盐、磷酸盐、氯化物。



(三) 有机物质 (Organic materials)

粘土岩中常有数量不等的有机物质。

有些粘土岩中含有大量的炭质，是成煤的原始有机物质。



(四) 粘土岩的化学成分

粘土岩的化学成分主要为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 H_2O ，可达80%，其次为 Fe_2O_3 、 FeO 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 等。



四、粘土岩的结构、构造和颜色

Textures , structures and colors of clayrocks

(一) 粘土岩的结构 (Textures of clayrocks)

1. 按颗粒的相对含量划分

粘土结构

含粉砂 (砂) 粘土结构

粉砂 (砂) 质粘土结构

按照粘土质点和粉砂 (砂) 相对含量划分的粘土岩结构类型

结构类型	粘土及粉砂 (砂) 含量	
	粘土, %	粉砂 (砂), %
粘土结构	>90	<10
含粉砂 (砂) 粘土结构	75~90	25~10
粉砂 (砂) 质粘土结构	50~75	50~25



2. 按粘土矿物的结晶程度及晶体形态划分

非晶质结构

隐晶质结构

显晶质结构

3. 鲕粒及豆粒结构

4. 内碎屑结构

5. 残余结构



(二) 粘土岩的构造 (Structures of clayrocks)

宏观构造

层理 (水平层理、块状层理等)

各种层面构造 (干裂、雨痕、……)

水底滑动构造

显微构造

显微鳞片构造

显微毡状构造

显微定向构造

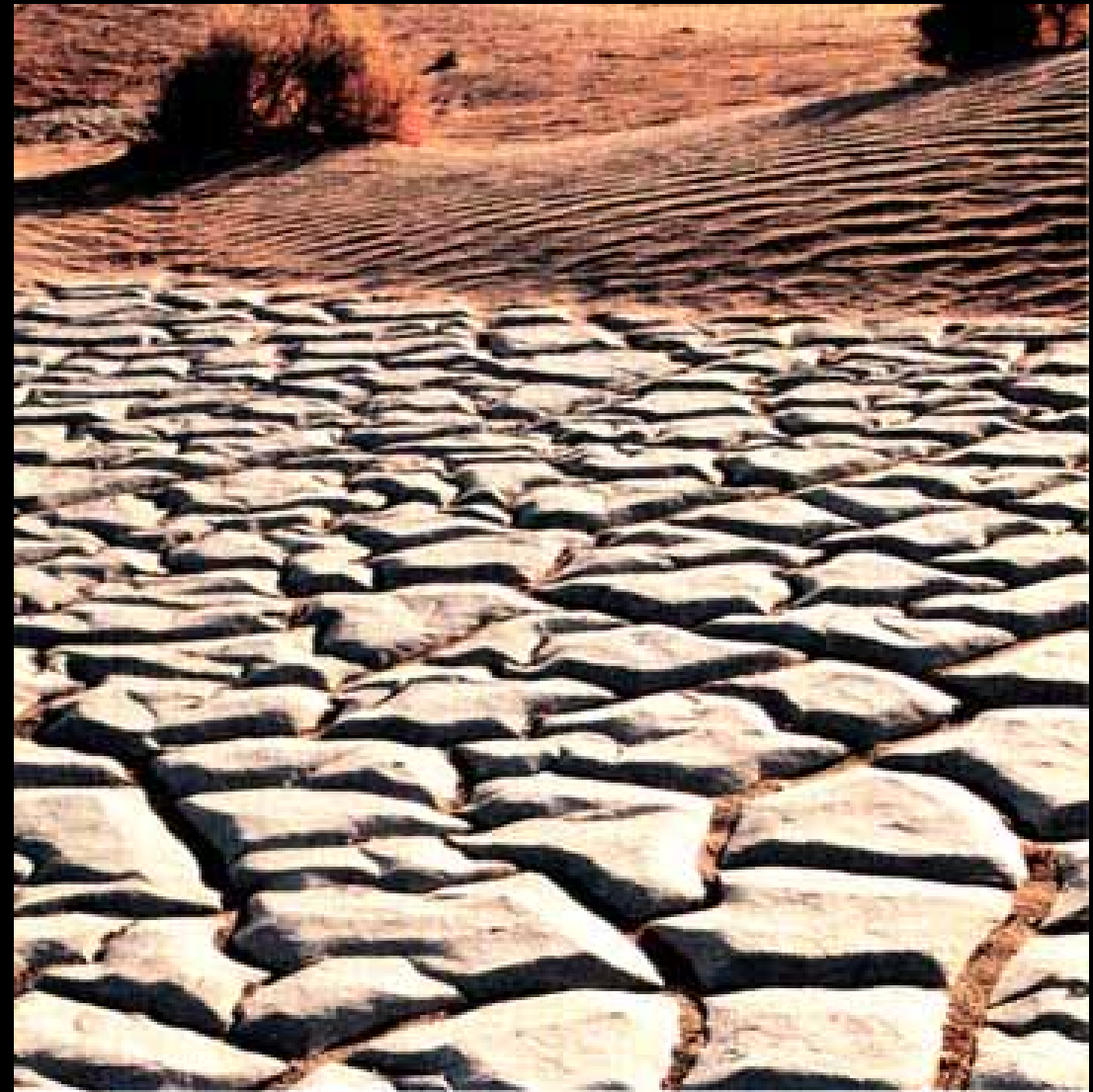
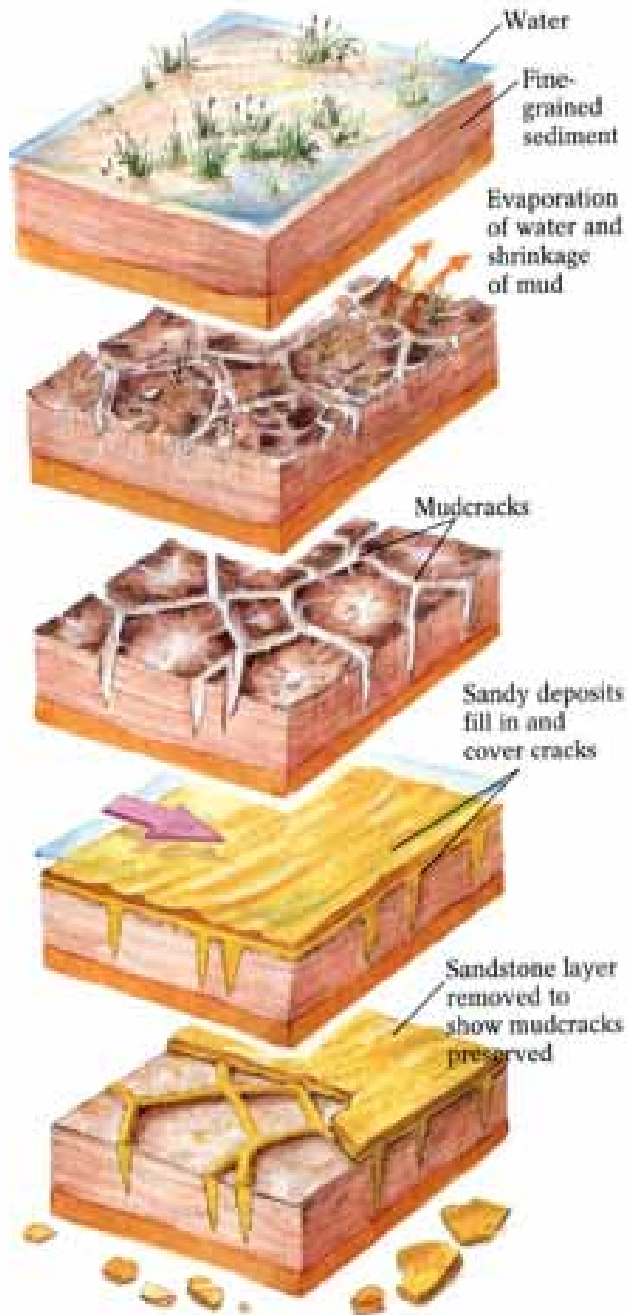


Ripple marks



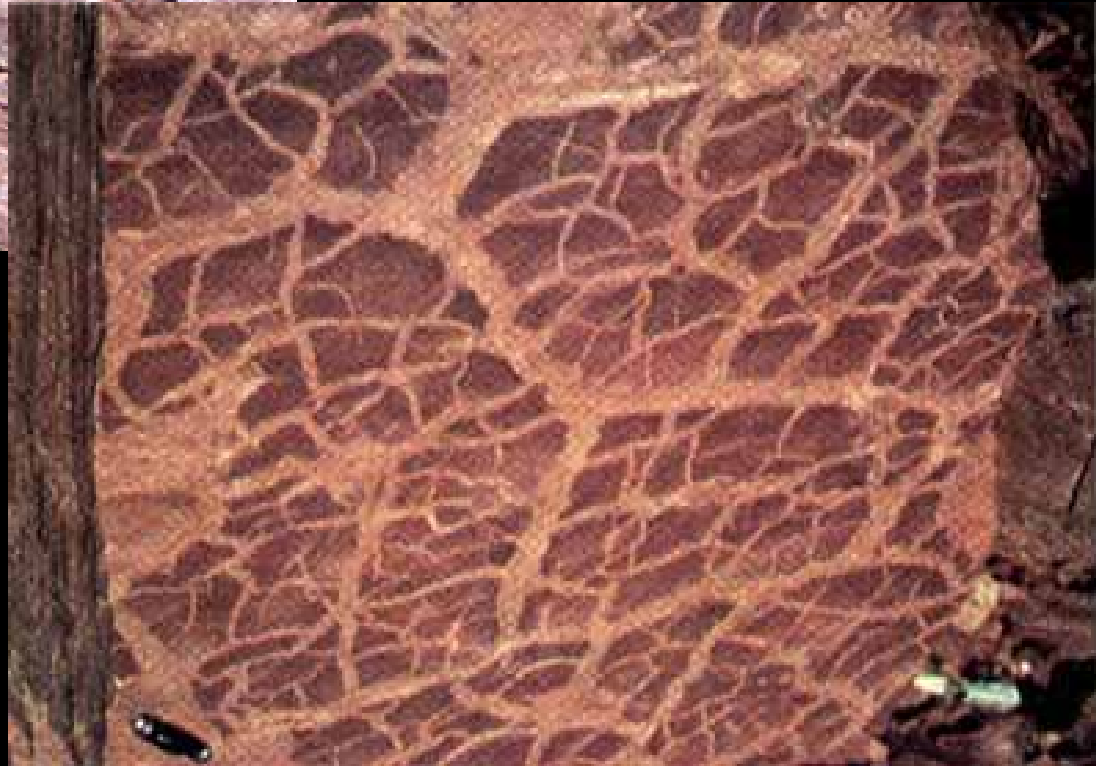


Mud Cracks





Mud Cracks





(三) 粘土岩的颜色 (Colors of clayrocks)

粘土岩常见的颜色有红、紫、褐黄、灰绿、灰黑、黑色等，颜色的差异与粘土岩含的有机碳、铁离子的氧化状态等因素有关。



五、粘土岩的分类 (Classification of clayrocks)

粘土岩综合分类

固结程度		结构 (粉砂含量)			粘土矿物成分	混入物成分
		<5%	5~25%	25~50%		
未固结-弱固结		泥 (粘土)	含粉砂泥 (粘土)	粉砂质泥 (粘土)	高岭石粘土、蒙脱石粘土、伊利石粘土	
固结	无纹层无页理	泥岩	含粉砂泥岩	粉砂质泥岩	高岭石粘土岩、伊利石粘土岩、蒙脱石粘土岩、高岭石-伊利石、粘土岩	钙质泥岩、铁质泥岩、硅质泥岩
	有纹层有页理	页岩	含粉砂页岩	粉砂质页岩		钙质页岩、碳质页岩、铁质页岩、黑色页岩、硅质页岩、油页岩
强固结		泥板岩				



粘土岩的综合分类

结构及成分		固 结 程 度			强固结 (重结晶矿物 >50%)
		未—弱固结 (未重结晶)	固 结 (未—中等重结晶)		
			无页理	有页理	
结构 (粉砂 或砂含量)	<10%	粘土	泥岩	页岩	泥板岩
	10%~25%	含粉砂(砂)粘土	含粉砂(砂)泥岩	含粉砂(砂)页岩	
	25%~50%	粉砂(砂)质粘土	粉砂(砂)质粘土岩	粉砂(砂)质页岩	
粘土矿物成分	高岭石	高岭石粘土(高岭土)	高岭石泥岩	高岭石页岩	
	蒙脱石	蒙脱石粘土(膨润土)	蒙脱石泥岩	蒙脱石页岩	
	伊利石	伊利石粘土	伊利石泥岩	伊利石页岩	
	海泡石	海泡石粘土	海泡石泥岩	海泡石页岩	
	高岭石、蒙脱石	高岭石—蒙脱石粘土	高岭石—蒙脱石泥岩	高岭石—蒙脱石页岩	
	高岭石、伊利石	高岭石—伊利石粘土	高岭石—伊利石泥岩	高岭石—伊利石页岩	
混入物成分	蒙脱石、伊利石	蒙脱石—伊利石粘土	蒙脱石—伊利石泥岩	蒙脱石—伊利石页岩	
	钙质	—	钙质泥岩	钙质页岩	
	铁质		铁质泥岩	铁质页岩	
	硅质		硅质泥岩	硅质页岩	
	有机质		碳质泥岩、 暗(黑)色泥岩	碳质页岩、 黑色页岩、 油页岩	



六、粘土沉积物的沉积后变化

粘土沉积物的沉积后变化——主要表现为
压实作用、粘土矿物的转化作用和脱水作用。

(一) 压实作用 (Compaction)

粘土物质沉积后，处于软泥状态，其原始孔隙度达70~90%，孔隙中饱含自由水。



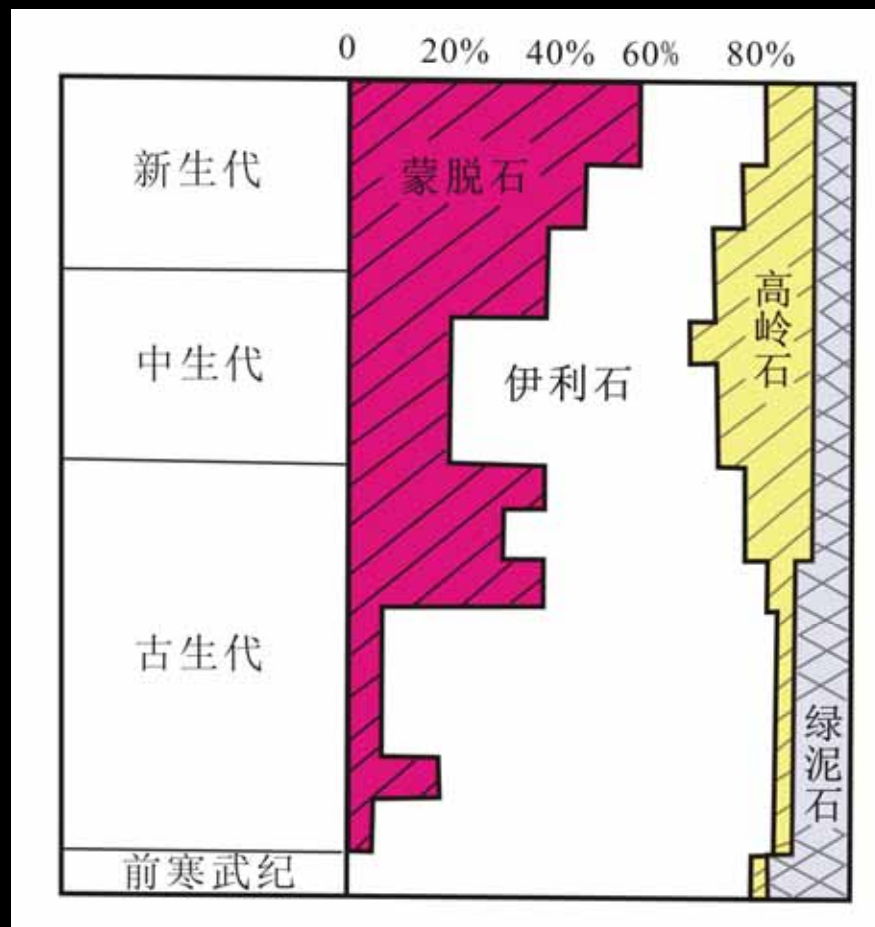
随着埋藏深度的增加，在上覆水体和沉积物负荷的重压下，粘土质点将重新排列、变形或破裂，孔隙水不断排出，原始粘土沉积物孔隙度大大降低，体积缩小，最后被压固结成为粘土岩。

- 埋深300~500m，孔隙水很容易排出，孔隙度急剧降低。
- 埋深>500m，孔隙度降低显著变缓。
- 埋深2000m左右，孔隙度为10~15%。
- 埋深4000m，孔隙度为5~10%（ ? ）。
- 埋深6000m，孔隙度为3~3.5%。



(二) 粘土矿物的转化作用 (Inversion of clay minerals)

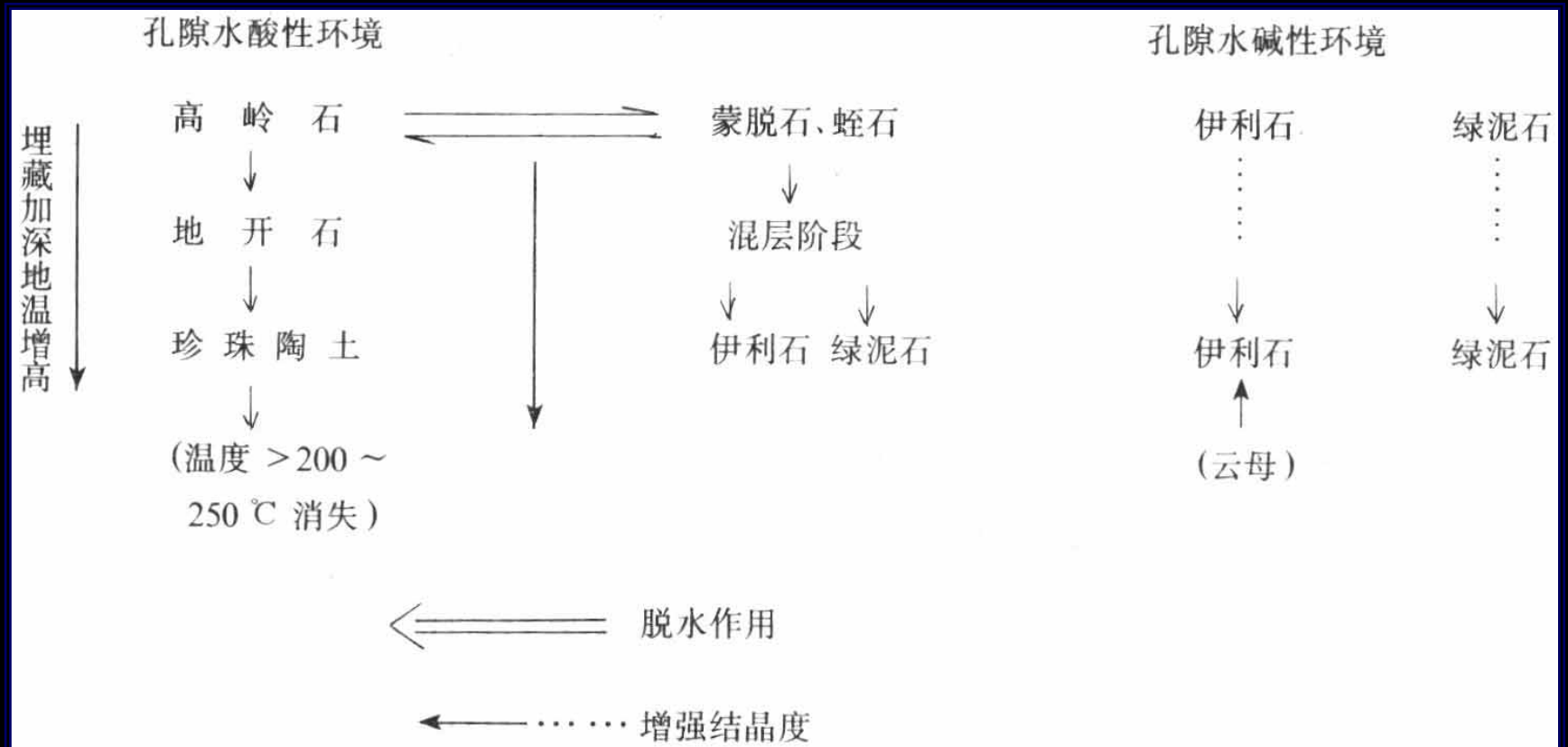
随着埋藏深度的增加、压力和温度的增加，粘土矿物之间将发生转化作用。



不同地质时代中粘土矿物的分布



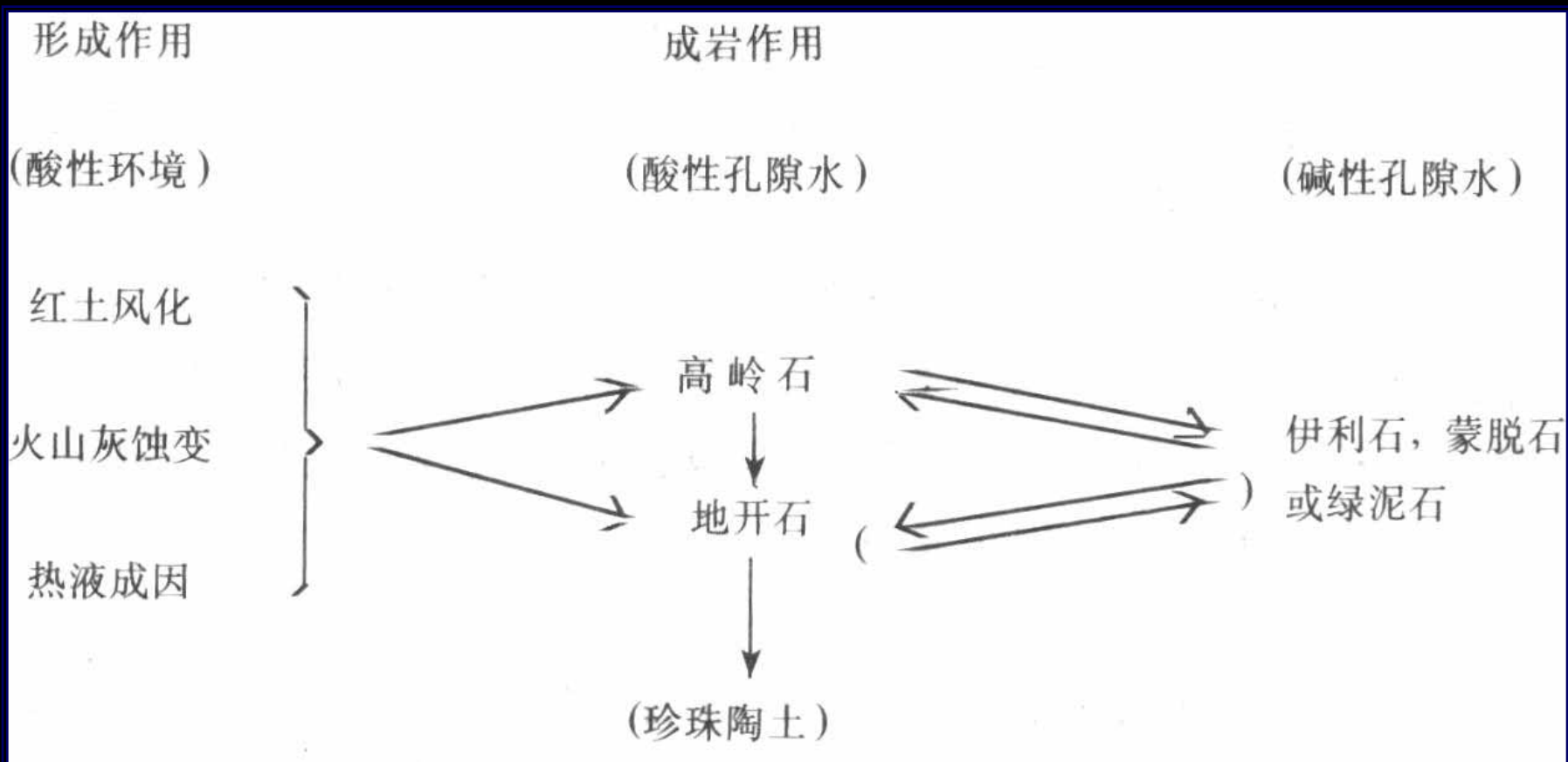
浅埋条件下，粘土矿物可出现高岭石和蒙脱石；深埋条件下，这些矿物消失而转化成伊利石和绿泥石。





1. 高岭石的转化

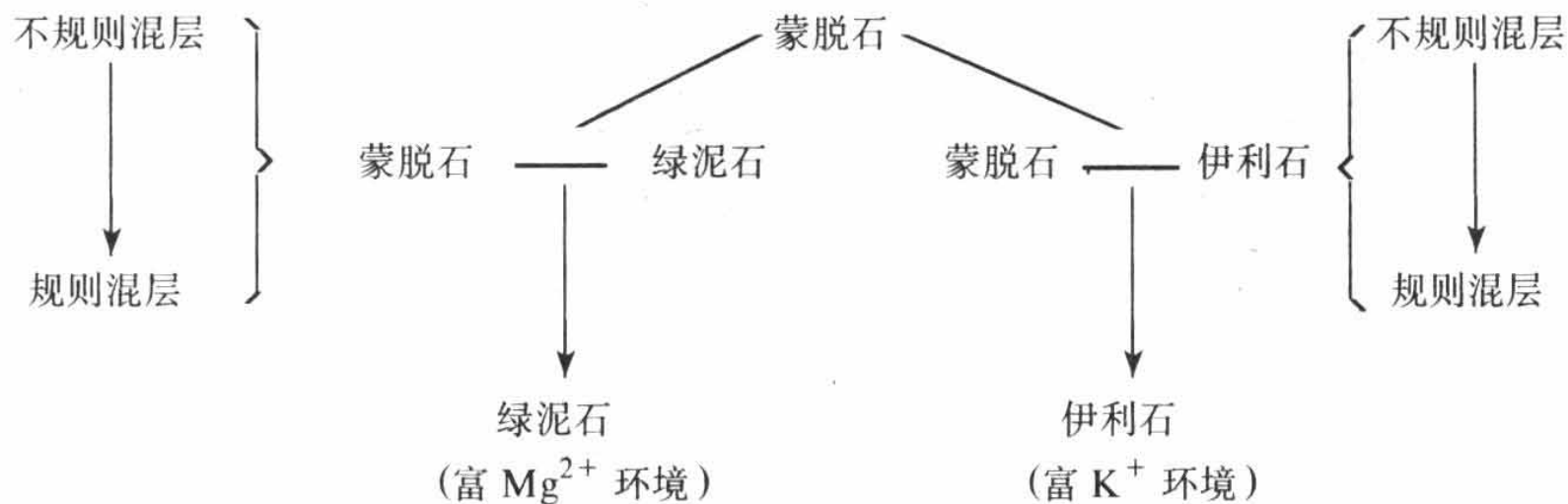
高岭石类的粘土矿物在埋藏成岩过程中的转化趋势是转变为蒙脱石、伊利石或绿泥石。



2. 蒙脱石的转化

随埋深的增加，蒙脱石向伊利石转化。

蒙脱石向伊利石或绿泥石转化的重要条件是孔隙水为碱性介质，如果孔隙水为酸性，蒙脱石则将向高岭石转化。





3. 伊利石和绿泥石的转化

伊利石和绿泥石在埋藏成岩过程中，若孔隙水保持碱性，二者可保持稳定而不发生变化。若孔隙水为酸性，则二者均不稳定，并且可以转化为高岭石。这种逆向转化是一种退变作用，常出现于表生成岩环境。



4. 混层粘土矿物的转化

混层矿物为大多数粘土矿物转化的中间产物，常起着粘土矿物转化的指示剂作用。

在埋藏成岩过程中，混层粘土矿物显示为进变作用过程。

在表生成岩环境中，若有混层粘土矿物，表示粘土矿物逆向转化为退变作用过程。



(三) 粘土矿物的脱水作用

(Dehydration of clay sediments)

孔隙水 (粒间水、自由水) ——存在于粘土沉积物颗粒间的孔隙中，可以自由流动。

吸附水 (薄膜水) ——由粘土颗粒表面的吸附作用而形成在颗粒表的水化薄膜。

层间水 (结晶水) ——以水分子形式在在于粘土矿物晶体结构单元层之间的水。

结构水 (化合水) ——以OH⁻的形式出现于粘土矿物晶体结构内部。



根据伯斯特（1969）的研究，蒙脱石转化过程中的脱水作用可划分为三个阶段：

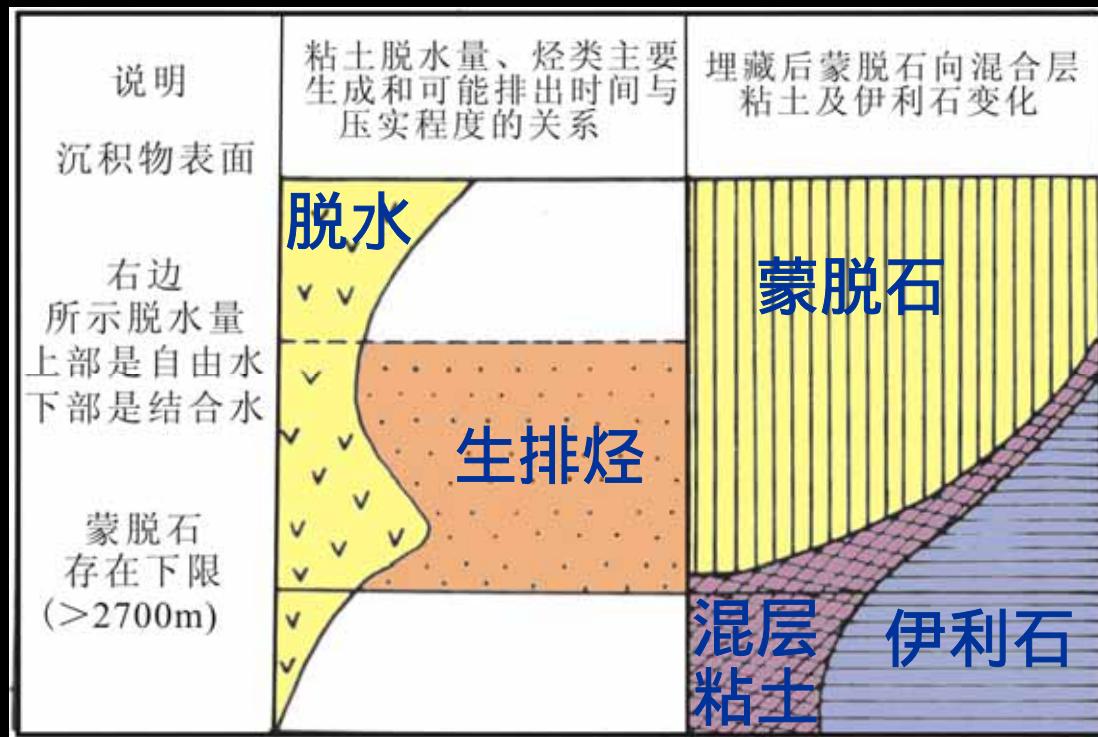
第一阶段：由压实作用引起，埋深1000~1500m以内，所脱去的水为孔隙水和过量的层间水，含水量减至30%（20~25%为层间水，5~10%为残留孔隙水）。

第二阶段：埋深 $>1500\text{m}$ ，地温 $60\sim 130$ ，主要是热力作用残留层间水而转化为混层粘土矿物。

第三阶段：埋深 $>2700\text{m}$ ，地温 > 130 ，脱去最后一层残余层间水，最终转变为非混层的伊利石。



粘土矿物的脱水过程，既是粘土矿物孔隙水、吸附水和层间水含量逐渐减少的过程，也是粘土矿物向混层粘土矿物转化，最后变为在深层较为稳定的非混层粘土矿物的过程，也是压实作用进行和油气生成的过程。





(四) 粘土沉积物沉积后作用与油气生成的关系

Relationship between postsedimentary changes of clay sediments and origin of petroleum

粘土沉积物与有机质的关系极为密切。在沉积过程中，细粘土矿物最大限度地富集了有机质。

据统计，与粘土矿物有关的有机质占沉积物中全部有机质的80~85%，而蒙脱石粘土沉积物是有机质最主要的寄存者。

它们在埋藏成岩过程中随埋深和地温的增加一起发生演化。



蒙脱石和伊利石转化与有机质向石油转化有密切关系。

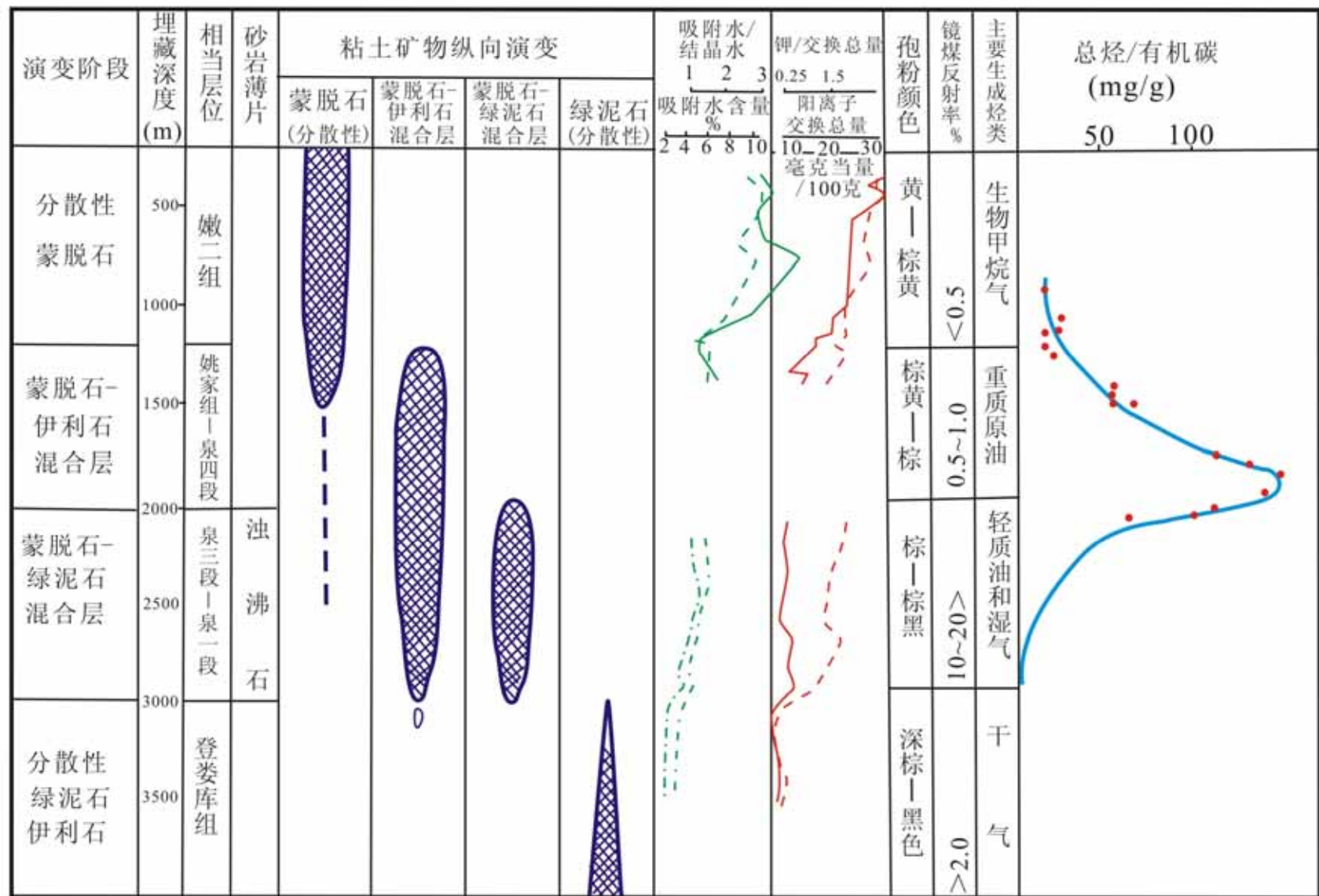
粘土矿物是有机质向石油转化的催化剂。

在早期，由于粘土矿物的存在促进了脂肪酸的脱羧基作用而形成长链烷烃，这个过程大致在地温 <60 、埋深 $<1500\text{m}$ 、蒙脱石脱去大量孔隙水的第一阶段。



此后，在蒙脱石向混层粘土转化过程中，由于脱水形成的酸性环境进一步促进了长链烷烃的裂解，形成石油烃，这是**石油形成的主要阶段**，埋深约1500~2700m、地温约60~130℃，相当于蒙脱石脱水的第二阶段。

这一阶段脱水和石油生成同时进行，脱出的孔隙水和层间水向外排出，成为石油从生油母岩向储集层进行初次运移的良好**载体**；同时，脱水过程也是粘土沉积物体积收缩、孔隙相对增大的过程，为石油的初次运移提供了良好的**通道**。



松辽盆地白垩系粘土矿物转化与有机质向石油转化的关系



研究表明，在一个沉积盆地内，蒙脱石—伊利石混层粘土矿物出现的深度和温度与有机质开始转化为石油的深度和温度是一致的。

因此，可以把蒙脱石—伊利石混层粘土矿物的出现作为有机质向石油转化的标志。



七、粘土岩的研究方法

Research methods of clayrocks

(一) 野外研究方法

- 宏观特征：颜色、结构、构造、岩层厚度、接触关系、横向变化等。
- 初步命名



(二) 室内研究方法

1. 薄片法
2. 粒度分析
3. 染色分析
4. 差热分析
5. 加热脱水分析
6. 电子显微镜分析
7. X射线衍射分析



本节要点：

- 粘土岩的定义
- 粘土岩的物质成分
- 粘土岩的转化与石油之间的关系（重点）