

中华人民共和国石油天然气行业标准

SY/T 5477—2003
代替 SY/T 5477—92

碎屑岩成岩阶段划分

The division of diagenetic stages in clastic rocks

2003-03-18 发布

2003-08-01 实施

国家经济贸易委员会 发 布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 成岩阶段划分依据	1
5 同生成岩阶段的主要标志	2
6 早成岩阶段、中成岩阶段、晚成岩阶段的主要标志	2
7 表生成岩阶段的主要标志	9
附录 A (规范性附录) 伊利石/蒙皂石混层比计算方法	10
附录 B (规范性附录) 伊利石结晶度的 X 射线衍射测定方法及其地质应用	11

前 言

本标准是对 SY/T 5477—92《碎屑岩成岩阶段划分规范》的修订。所作修改和补充如下：

- 原标准中划分的早成岩阶段和晚成岩阶段改划分为早、中、晚成岩阶段，原标准中划分的早成岩阶段 A 期、B 期不变，将原划分的晚成岩阶段 A 期、B 期分别改划分为中成岩阶段 A 期、B 期，原划分的晚成岩阶段 C 期改为晚成岩阶段；
- 在原标准以淡水—半咸水水介质为代表的碎屑岩成岩阶段划分基础上，增加了酸性水介质（含煤地层）环境下碎屑岩成岩阶段划分的标准和依据，以及碱性水介质（盐湖盆地）环境下成岩阶段划分的标准和依据；
- 在成岩阶段划分指标上增加了泥岩最大热解峰温 T_{\max} 指标；
- 增加了用伊利石结晶度划分成岩阶段的标志。

本标准从生效之日起，同时代替 SY/T 5477—92。

本标准的附录 A 和附录 B 为规范性附录。

本标准由石油地质勘探专业标准化委员会提出并技术归口。

本标准起草单位：中国石油勘探开发研究院实验中心、中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院。

本标准起草人：应凤祥、何东博、龙玉梅、林西生。

碎屑岩成岩阶段划分

1 范围

本标准规定了碎屑岩成岩阶段的命名及划分的依据、标志和方法。

本标准适用于石油天然气行业碎屑岩成岩阶段划分及特征研究。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注明日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

SY/T 5163—1995 沉积岩粘土矿物相对含量 X 射线衍射分析方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

成岩阶段 diagenetic stage

碎屑岩成岩阶段指碎屑沉积物沉积后经各种成岩作用改造直至变质作用之前所经历的不同地质历史演化阶段。可划分为同生成岩阶段（syndiagenetic stage）、早成岩阶段（early diagenetic stage）、中成岩阶段（middle diagenetic stage）、晚成岩阶段（late diagenetic stage）和表生成岩阶段（epidiagenetic stage）。

3.2

同生成岩阶段 syndiagenetic stage

沉积物沉积后尚未完全脱离上覆水体时发生的变化与作用的时期称同生成岩阶段。

3.3

表生成岩阶段 epidiagenetic stage

指处于某一成岩阶段弱固结或固结的碎屑岩，因构造抬升而暴露或接近地表，受到大气淡水的溶蚀，发生变化与作用的阶段。

4 成岩阶段划分依据

成岩阶段划分依据有：

- a) 自生矿物分布、形成顺序；
- b) 粘土矿物组合、伊利石/蒙皂石（I/S）混层粘土矿物的转化〔参考雷诺尔兹的伊利石/蒙皂石（I/S）混层粘土矿物 X 衍射标准图版，用 V/P 法计算〕以及伊利石结晶度，见附录 A、附录 B；
- c) 岩石的结构、构造特点及孔隙类型；
- d) 有机质成熟度；
- e) 古温度：
 - 流体包裹体均一温度；
 - 自生矿物形成温度；

——伊利石/蒙皂石 (I/S) 混层粘土矿物的演化。

5 同生成岩阶段的主要标志

- a) 岩石 (沉积物) 疏松, 原生孔隙发育;
- b) 海绿石主要形成于本阶段;
- c) 鲕绿泥石的形成;
- d) 同生结核的形成;
- e) 沿层理分布的微晶及斑块状泥晶菱铁矿;
- f) 分布于粒间及粒表的泥晶碳酸盐, 有时呈纤维状及微粒状方解石;
- g) 有时有新月形及重力胶结;
- h) 在碱性水介质 (盐湖盆地) 中析出的自生矿物有粉末状和草莓状黄铁矿、他形粒状方沸石、基底式胶结或斑块状胶结的石膏、钙芒硝, 可见石英等硅酸盐矿物的溶蚀现象等。

6 早成岩阶段、中成岩阶段、晚成岩阶段的主要标志

根据沉积水介质性质的不同, 可分为淡水—半咸水水介质、酸性水介质 (含煤地层) 和碱性水介质 (盐湖), 其形成的碎屑岩在成岩特征和标志上既有共同规律, 又有各自的特殊性, 现分述于后。

6.1 淡水—半咸水水介质碎屑岩早成岩阶段、中成岩阶段、晚成岩阶段的主要标志

其岩石矿物学、古地温、有机质成熟度等标志见表 1。

6.1.1 早成岩阶段

分为 A、B 两期。

6.1.1.1 早成岩阶段 A 期

- a) 古温度范围为古常温~65℃;
- b) 有机质未成熟, 其镜质体反射率 $R_o < 0.35\%$, 最大热解峰温 $T_{max} < 430^\circ\text{C}$, 孢粉颜色为淡黄色, 热变指数 $TAI < 2.0$;
- c) 岩石弱固结—半固结, 原生粒间孔发育;
- d) 泥岩中富含蒙皂石, 及蒙皂石层占 70% 以上的伊利石/蒙皂石 (I/S) 无序混层粘土矿物 (有序度 $R = 0$), 统称蒙皂石带;
- e) 砂岩中一般未见石英加大, 长石溶解较少, 可见早期碳酸盐胶结 (呈纤维状、栉壳状、微粒状) 及绿泥石环边, 粘土矿物可见蒙皂石、无序混层矿物及少量自生高岭石。

6.1.1.2 早成岩阶段 B 期

- a) 古温度范围为大于 65℃~85℃;
- b) 有机质半成熟, 镜质体反射率 R_o 为 0.35%~0.5%, 最大热解峰温 T_{max} 为 430℃~435℃, 孢粉颜色为深黄色, 热变指数 TAI 为 2.0~2.5;
- c) 由于压实作用及碳酸盐类等矿物的胶结作用, 岩石由半固结到固结, 孔隙类型以原生孔隙为主, 并可见少量次生孔隙;
- d) 泥岩中蒙皂石明显向伊利石/蒙皂石 (I/S) 混层粘土矿物转化, 蒙皂石层占 70%~50%, 属无序混层 (有序度 $R = 0$), 称无序混层带;
- e) 砂岩中可见 I 级石英次生加大, 加大边窄或有自形晶面, 扫描电子显微镜下可见石英小雏晶, 呈零星或相连成不完整晶面, 书页状自生高岭石较普遍, 有的砂岩受火山碎屑颗粒的影响, 仍可见蒙皂石;
- f) 在有的砂岩基质中有云雾状燧石;
- g) 可见一些矿物交代和转化现象。

表 1 淡水—半咸水水质碎屑岩成岩阶段划分标志

成岩阶段	古温 度℃	有机质			泥岩		砂岩中自生矿物										溶解作用		孔隙类型							
		R_o %	T_{max} ℃	成熟阶段	I/S 中的 S %	I/S 泥层 分带	砂岩 固结 程度	蒙皂石	I/S 泥层	C/S 泥层	高岭石	伊利石	绿泥石	石英加大 级别	方解石	铁白云石	长石加大	钠长石化		方沸石	片沸石	油沸石	烟石	石膏	硬石膏	沸石类
同生 成岩阶段	古温 度	①海绿石、鲕绿泥石的形成；②同生结核的形成；③平行层里面分布的泥质结核及富含状微晶；④分布于粒间和颗粒表面的泥晶微晶；⑤烃类未成熟																								
		A	古温 度 ~65	<0.35	<430	未成熟	生物气	>70	裂 皂 石 带	弱固 结—— 半固 结																
早成 岩阶段	B	>65 ~85	430 ~435	半成熟	低成熟——成熟	70 ~50	无序 带	半固 结—— 固结																		原生孔隙 及少量次 生孔隙
	A	>85 ~140	>435 ~460	低成熟——成熟	原油为主	<50 ~15	有序 带	固结																		可保留原 生孔隙次 生孔隙发 育
中成 岩阶段	B	>140 ~175	>460 ~490	高成熟	凝析 油—— 凝析 气	<15	超点 带																			孔隙减少 并出现裂 缝
	晚成 岩阶段	>175 ~200	>490 ~4.0	过成熟	干气	消失	伊利 石带																			裂缝发育
表 生成 成岩阶段	古温 度 常温	>2.0	>4.0	过成熟	干气	消失	伊利 石带																			④新月形

注 1：因地区构造运动、在地层历史过程中有可能在早成岩阶段、中成岩阶段或晚成岩阶段的任何时期出现表生成岩阶段，也可能不出现表生成岩阶段，各地区具体情况而定。

注 2：-----表示少量重质油可能出现的过程标志。

注 1：因地壳构造运动，在地壳历史过程中有可能在早成岩阶段、中成岩阶段或晚成岩阶段的任何时期出现发生成岩阶段，也可能不出现发生成岩阶段，各地区视具体情况而定。

注 2：“-----”表示少量或可能出现的成岩标志。

6.1.2 中成岩阶段

分为 A、B 两期。

6.1.2.1 中成岩阶段 A 期

- 古温度范围为 $>85^{\circ}\text{C} \sim 140^{\circ}\text{C}$;
- 有机质低成熟—成熟, 镜质体反射率 $R_o > 0.5\% \sim 1.3\%$, 最大热解峰温 $T_{\text{max}} > 435^{\circ}\text{C} \sim 460^{\circ}\text{C}$, 孢粉颜色为桔黄—棕色, 热变指数 $TAI > 2.5 \sim 3.7$;
- 泥岩中的伊利石/蒙皂石 (I/S) 混层粘土矿物, 蒙皂石层占 $< 50\% \sim 15\%$, 其中 $< 50\% \sim 35\%$ 属部分有序混层 ($R = 0/R = 1$), $< 35\% \sim 15\%$ 属有序混层 ($R = 1$), 在某些有火成岩侵入的地层中或富含火山碎屑物质的岩石中, 蒙皂石和伊利石/蒙皂石 (I/S) 混层粘土矿物的转化和分布有时出现异常, 应综合其它指标进行成岩阶段划分。
- 砂岩中可见晚期含铁碳酸盐类胶结物, 特别是铁白云石, 常呈粉晶—细晶, 以交代、加大或胶结形式出现, 还可见其它自生矿物如钠长石、浊沸石、片沸石、方沸石等;
- 石英次生加大属 II 级, 大部分石英颗粒和部分长石颗粒具次生加大, 自形晶面发育, 有的见石英小晶体, 在扫描电子显微镜下, 多数石英颗粒表面被较完整的自形晶面包裹, 有的石英自生晶体向孔隙空间生长, 交错相接, 堵塞孔隙;
- 砂岩中粘土矿物, 可见自生高岭石、伊利石/蒙皂石 (I/S) 混层粘土矿物、呈丝状自生伊利石、叶片状或绒球状自生绿泥石、绿泥石/蒙皂石 (C/S) 混层粘土矿物等, 蒙皂石基本上消失;
- 长石、岩屑等碎屑颗粒及碳酸盐胶结物常被溶解, 孔隙类型除部分保留的原生孔隙外, 以次生孔隙为主。

中成岩阶段 A 期, 根据泥岩中伊利石/蒙皂石 (I/S) 混层粘土矿物演化和有机质热演化特征, 以蒙皂石层占 35%、镜质体反射率 R_o 为 0.7% 或最大热解峰温 T_{max} 为 440°C 为界, 还可以细分为 A_1 、 A_2 两个亚期。 A_1 亚期有机质低成熟, 有机酸产量高, 为次生孔隙产生带。 A_2 亚期有机质成熟, 进入生油高峰, 有机酸浓度降低, 并由于胶结作用的出现, 使物性较 A_1 亚期略差。

6.1.2.2 中成岩阶段 B 期

- 古温度范围为 $>140^{\circ}\text{C} \sim 175^{\circ}\text{C}$;
- 有机质处于高成熟阶段, 镜质体反射率 $R_o > 1.3\% \sim 2.0\%$, 最大热解峰温 $T_{\text{max}} > 460^{\circ}\text{C} \sim 490^{\circ}\text{C}$, 孢粉颜色为棕黑色, 热变指数 $TAI > 3.7 \sim 4.0$;
- 泥岩中有伊利石及伊利石/蒙皂石 (I/S) 混层粘土矿物, 蒙皂石层小于 15%, 属超点阵或称卡尔克博格有序混层 (有序度 $R \geq 3$), 称超点阵有序混层带;
- 砂岩中石英次生加大为 III 级, 特别是富含石英的岩石几乎所有石英和长石具有加大且边宽, 多呈镶嵌状, 高岭石明显减少或缺失, 有的可见含铁碳酸盐类矿物、浊沸石和钠长石化;
- 扫描电子显微镜下, 颗粒间石英自形晶体相互连接, 岩石致密, 有裂缝发育。

6.1.3 晚成岩阶段

- 古温度范围 $>175^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$;
- 有机质处于过成熟阶段, 镜质体反射率 $R_o > 2.0\% \sim 4.0\%$, 最大热解峰温 $T_{\text{max}} > 490^{\circ}\text{C}$, 孢粉颜色为黑色, 热变指数 $TAI > 4.0$;
- 岩石已极致密, 颗粒呈缝合接触及有缝合线出现, 孔隙极少而有裂缝发育;
- 砂岩中可见晚期碳酸盐类矿物以及钠长石、榍石等自生矿物, 石英加大属 IV 级, 颗粒间呈缝合状接触, 自形晶面消失;
- 砂岩和泥岩中代表性粘土矿物为伊利石和绿泥石, 并有绢云母、黑云母, 混层已基本消失, 称伊利石带或伊利石—绿泥石带。根据伊利石的结晶度, 其 Kubler 指数 ($K.I$) 为 $0.25^{\circ} (\Delta 2\theta) < K.I < 0.42^{\circ} (\Delta 2\theta)$ 属于晚成岩期。

6.2 酸性水介质(含煤地层)碎屑岩早成岩阶段、中成岩阶段、晚成岩阶段的主要标志 其岩石矿物学、古温度、有机质成熟度等标志见表2。

6.2.1 早成岩阶段

含煤地层富含水生和陆生植物,埋藏后易产生腐殖酸,成岩早期具有酸性水介质条件。

6.2.1.1 早成岩阶段 A 期

- 其古温度指标、有机质成熟度指标、泥岩中 I/S 混层演化指标同表 1 早成岩阶段 A 期;
- 岩石弱固结—半固结,原生粒间孔发育;
- 砂岩中自生矿物不发育,局部见少量方解石或菱铁矿,颗粒周围还可见少量绿泥石薄膜。

6.2.1.2 早成岩阶段 B 期

- 其古温度指标、有机质成熟度指标、泥岩中 I/S 混层演化指标同表 1 早成岩阶段 B 期;
- 由于缺乏早期碳酸盐胶结物,压实强,颗粒可呈点—线状接触,压实作用使原生孔隙明显减少;
- 砂岩中胶结物少,局部可有少量早期方解石,粘土矿物以伊利石/蒙皂石(I/S)无序混层为主,还可见少量绿泥石和伊利石,在富火山碎屑的岩石中可见蒙皂石;
- 早成岩阶段 B 期末出现早期石英加大,有的具有明显加大边,使颗粒在单偏光下观察呈线状接触,自生高岭石也相当发育,还可见少量粒内溶孔及铸模孔;
- 可见一些矿物交代和转化现象。

6.2.2 中成岩阶段

6.2.2.1 中成岩阶段 A 期

- 其古温度指标、有机质成熟度指标、泥岩中 I/S 混层演化指标同表 1 中成岩阶段 A 期;
- 在富含石英和长石的砂岩中,自生矿物组合以石英加大和自生高岭石发育为特点,但它们的发育程度与石英、长石颗粒和填隙物的含量有关,在石英颗粒含量少而富含火山岩屑的砂岩中,石英次生加大不发育。另外还可见长石加大、自生钠长石、方解石、菱铁矿、浊沸石、硬石膏、伊利石、绿泥石、伊利石/蒙皂石(I/S)混层粘土矿物以及石英颗粒裂缝愈合和高岭石向绿泥石转化等现象;
- 在中成岩阶段 A 期后期,水介质开始由酸性向碱性转变,出现含铁方解石、铁白云石等晚期碳酸盐的胶结、交代作用,使孔隙度下降;
- 颗粒间主要呈线状接触,少量凹凸接触;
- 除部分碳酸盐溶解外,以长石和火山岩屑颗粒溶解为主,形成粒内溶孔、铸模孔等次生孔隙,岩石具有孔径大喉道窄的特征,另外还可见裂缝。

参照淡水—半咸水水介质碎屑岩中成岩阶段 A 期,可以分为 A₁、A₂ 两个亚期。

6.2.2.2 中成岩阶段 B 期

- 其古温度指标、有机质成熟度指标、泥岩中伊利石/蒙皂石(I/S)混层演化指标同表 1 中成岩阶段 B 期;
- 砂岩中的自生矿物以铁方解石、铁白云石发育为特征,以交代作用为主,石英加大可达Ⅲ级,有的还可见长石加大以及楣石、硬石膏、重晶石等;
- 砂岩中高岭石、伊利石/蒙皂石(I/S)混层粘土矿物含量下降,伊利石、绿泥石含量升高,成为主要粘土矿物类型;
- 孔隙类型以裂缝为主,少量溶孔;
- 颗粒间呈线—凹凸状接触或缝合状接触。

6.2.3 晚成岩阶段

- 其古温度指标、有机质成熟度指标、泥岩中 I/S 混层演化指标同表 1 晚成岩阶段;
- 砂岩中自生矿物为铁白云石、石英加大(可达Ⅳ级)、少量楣石等,粘土矿物有绿泥石、伊利石、黑云母挤压变形,有的被菱铁矿交代或伊利石化;

表 2 酸性水介质 (含煤地层) 碎屑岩成岩阶段划分标志

成岩阶段	有机质			泥岩		砂岩中自生矿物										溶解作用		孔隙类型					
	古温度℃	R _g %	T _{max} ℃ 灰粉颜色TAT	成熟阶段	烃类演化	I/S中的S ₁ %	I/S泥层分带	砂岩固结程度	伊利石	绿帘石	高岭石	石英加大	方解石	菱铁矿	铁白云石	长石加大	钠长石化		重晶石	沸石	榍石	硬石膏	长石及杂屑
同生阶段	①海绿石、绿帘石的形成；②原生绿帘石的形成；③平行层理面分布的菱铁矿微晶及菱铁矿晶体；④分布于粒间和颗粒表面的泥晶碳酸盐；⑤胶态未成熟																						
	早成岩阶段	A	古常温 ~65	<0.35 ~430	未成熟 海绿 <2.0	生物气	无气带 >70	弱固结 带砂 一半固结	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状
中成岩阶段	A	>85 ~140	>0.5 ~1.3	低成熟—成熟 结痕—条 2.5~3.7	原油为主	有气带 <50 ~15	有序泥层带	固结	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状
	B	>140 ~175	>1.3 ~2.0	高成熟 结痕 >3.7 ~4.0	凝析油为主	超点带 <15	超点带泥层带	固结	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状
晚成岩阶段	A	>175 ~200	>2.0 ~4.0	过成熟 黑 >4.0	干气	消失	伊利石带	固结	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状	呈书状或蠕虫状
表生阶段	①含低价铁的矿物 (如黄铁矿、菱铁矿、白云石、硬石膏、云母、绿帘石等) 的褐铁矿化；②褐铁矿的胶结现象；③碎屑颗粒表面的高价铁的氧化膜；④新月形碳酸盐胶结物及重力胶结；⑤渗流充填物；⑥原生钙质胶结；⑦硬石膏的石膏化；⑧胶体石膏；⑨溶解孔、洞；⑩胶体氧化钾																						
注 1: 因此类构造运动, 在地质历史过程中有可能在早成岩阶段、中成岩阶段或晚成岩阶段的任何时期出现表现生成岩阶段, 也可能不出现表现生成岩阶段, 各地区视具体情况而定。																							
注 2: "——" 表示少量或可能出现的成岩标志。																							

- c) 孔隙类型以裂缝为主, 少量长石岩屑溶孔;
- d) 颗粒间呈线—缝含状接触, 有的可见石英颗粒压裂及愈合现象。

6.3 碱性水介质(盐湖盆地)碎屑岩早成岩阶段、中成岩阶段、晚成岩阶段的主要标志

其岩石矿物学、古温度、有机质成熟度等标志见表3。

盐湖盆地可见三种水化学类型, 即碳酸盐型、硫酸钠型及氯化物型, 以碳酸盐型和硫酸钠型占多数, 由于水化学性质的差别, 所以析出的盐类矿物在不同盐湖盆地也会有差别, 一般析出的顺序为方解石、白云石—石膏带、石盐带、硫酸钠镁盐带、钾盐带等。

6.3.1 早成岩阶段

6.3.1.1 早成岩阶段A期

- a) 其古温度指标、有机质成熟度指标同表1早成岩阶段A期;
- b) 颗粒间以点接触为主;
- c) 原生孔隙发育;
- d) 自生矿物有粒状方沸石、泥晶碳酸盐, 无石英次生加大, 古温度低于42℃时石膏及钙芒硝析出并呈基底式胶结碎屑颗粒, 古温度高于42℃时石膏向硬石膏转化或硬石膏和钙芒硝析出, 本期末泥晶含铁方解石和含铁白云石析出;
- e) 泥岩中粘土矿物以伊利石—绿泥石(I-C)组合和伊利石—绿泥石—伊利石/蒙皂石混层(I-C-I/S)组合为主, 伊利石/蒙皂石(I/S)混层主要为有序混层, 也有无序混层, 少见蒙皂石, 砂岩中可见高岭石;
- f) 可见石英、长石溶蚀现象。

6.3.1.2 早成岩阶段B期

- a) 其古温度指标、有机质成熟度指标同表1早成岩阶段B期;
- b) 颗粒间点接触为主, 部分线接触;
- c) 次生孔隙较发育, 形成原生孔隙、次生孔隙共存的局面;
- d) 自生矿物有亮晶方解石、白云石、含铁方解石、含铁白云石和泥晶铁白云石、孔隙式胶结的硬石膏和钙芒硝, 石英次生加大属Ⅰ级, 加大边窄且不连续, 偶见自形晶面, 部分长石次生加大;
- e) 泥岩中粘土矿物以伊利石—绿泥石(I-C)组合和伊利石—绿泥石—伊利石/蒙皂石混层(I-C-I/S)组合为主, 少见高岭石或蒙皂石, 伊利石/蒙皂石(I/S)混层为有序混层(蒙皂石层占20%~25%);
- f) 可见长石、碳酸盐和方沸石溶蚀。

6.3.2 中成岩阶段

6.3.2.1 中成岩阶段A期

- a) 其古温度指标、有机质成熟度指标同表1中成岩阶段A期;
 - b) 颗粒间以点—线接触为主, 局部出现凹凸接触;
 - c) (含)铁碳酸盐类胶结物大量出现, 常呈自形粉晶—细晶, 以孔隙式胶结或以交代、加大形式出现, 硬石膏和钙芒硝呈孔隙式胶结或以交代形式出现, 石英次生加大属Ⅱ级, 石英和长石普遍具有次生加大现象, 自形晶面发育, 扫描电子显微镜下颗粒表面被较完整的自形晶包裹或有自生石英晶体出现, 部分长石钠长石化, 方沸石逐渐减少直至消失;
 - d) 泥岩中粘土矿物以伊利石—绿泥石(I-C)组合和伊利石—绿泥石—伊利石/蒙皂石混层(I-C-I/S)组合为主, 偶见高岭石, 伊利石/蒙皂石(I/S)混层均为有序混层(蒙皂石层<20%);
 - e) 长石等碎屑颗粒及碳酸盐常被溶解, 次生孔隙发育, 本期末溶蚀缝开始出现。
- 参照淡水—半咸水介质碎屑岩中成岩阶段A期, 可以分为A₁、A₂两个亚期。

表 3 碱性水介质(盐湖盆地)碎屑岩成岩阶段划分标志

成岩阶段		有机质			砂岩固结程度		砂岩中自生矿物										溶蚀作用				颗粒接触类型		孔隙类型																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
阶段	期	R_o %	孢粉颜色 TAI	成熟阶段	烃类演化	砂岩固结程度	石膏	硬石膏	钙芒硝	方解石	含铁方解石	白云石	含铁白云石	铁白云石	菱铁矿	方沸石	长石加大	钠长石化	石英加大	石英	长石及岩屑	碳酸盐	方沸石	盐类																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
同生阶段	A	古潜温 ~65	①海绿石、方沸石、石膏、硬石膏、硬石膏的形成; ②同生结构的形成; ③平行层面分布的泥晶碳酸盐(方解石、白云石、菱铁矿)及斑状泥晶碳酸盐; ④分布于底部和颗粒表面的泥晶碳酸盐; ⑤石英等硅酸盐溶解; ⑥基底式胶结的石膏和钙芒硝形成; ⑦未成胶														弱固结—半固结	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶	泥晶

6.3.2.2 中成岩阶段 B 期

- a) 其古温度指标、有机质成熟度指标同表 1 中成岩阶段 B 期；
- b) 岩石致密，裂缝较发育，颗粒间以凹凸接触和缝合线接触为主，部分颗粒间为线接触；
- c) (含) 铁碳酸盐和硬石膏多以交代形式或以充填粒间孔形式出现，石英加大属Ⅲ级，大部分石英和长石次生加大，加大边宽且连续，石英自形晶面发育，扫描电子显微镜下石英自生晶体相互连结，大部分长石钠长石化；
- d) 泥岩中粘土矿物为伊利石—绿泥石组合。

6.3.3 晚成岩阶段

- a) 其古温度指标、有机质成熟度指标同表 1 晚成岩阶段；
- b) 岩石极致密，裂缝发育，有缝合线出现；
- c) 砂岩中可见 (含) 铁碳酸盐及钠长石等自生矿物，石英次生加大属Ⅳ级，颗粒间呈缝合线状接触，自形晶面消失，普遍见钠长石化现象；
- d) 砂岩和泥岩中代表性粘土矿物为伊利石和绿泥石，并有绢云母和黑云母。

7 表生成岩阶段的主要标志

- a) 含低价铁的矿物 (如黄铁矿、菱铁矿等) 被褐铁矿化或呈褐铁矿的浸染现象；
- b) 碎屑颗粒表面的氧化膜；
- c) 新月形碳酸盐胶结及重力胶结；
- d) 渗流充填物；
- e) 表生钙质结核；
- f) 硬石膏的石膏化；
- g) 表生高岭石；
- h) 溶蚀现象，有溶孔、溶洞产生，使不整合面下的次生孔隙发育，改善了物性；
- i) 断层和裂缝的发育，为地表水的向下渗透以及深部地层水和地表水的对流作用提供通道，同时也形成次生孔隙。

附 录 A
(规范性附录)

伊利石/蒙皂石混层比计算方法

A.1 对于无序和部分有序伊利石/蒙皂石混层 (I/S)，用 V/P 法计算。

A.1.1 算出混层比初值 S_0 ，见式 (A.1)。

$$S_0 = 66V/P + 39 \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

S_0 ——蒙皂石层在伊利石/蒙皂石混层中所占比例的初值，%；

V —— 17\AA 峰顶到 17\AA 峰谷的距离，mm；

P —— 17\AA 峰顶到底线的距离，mm。底线是一条通过最小背景点并与 2θ 坐标轴平行的直线。

A.1.2 算出混层比终值 S ，见式 (A.2)。

$$S = S_0 \cdot \sigma_i \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

S ——蒙皂石层在伊利石/蒙皂石混层中所占的比例，%；

σ_i ——与伊利石/蒙皂石混层含量 X 有关的修正系数。

$$\sigma_1 = 1.888 - 0.1952\ln X \quad S_0 \geq 75$$

$$\sigma_2 = 1.633 - 0.141\ln X \quad 75 > S_0 \geq 50$$

$$\sigma_3 = 1.129 - 0.0013\ln X \quad 50 > S_0 \geq 37$$

A.2 对于有序混层，其混层比 S 的确定见表 A.1。表中 2θ 为混层峰的衍射角，单位为 ($^\circ$)。当混层 I/S 的峰与伊利石 $10 \times 10^{-1}\text{nm}$ 的峰严重重叠不易区分时，应采用分峰技术确定混层 I/S 峰的峰位。

表 A.1 计算有序伊利石/蒙皂石混层比的数据表

混层比 S , %	35	30	25	20	15	10
衍射角 2θ , ($^\circ$)	6	6.6	7.0	7.3	7.7	8.3

附 录 B
(规范性附录)

伊利石结晶度的 X 射线衍射测定方法及其地质应用

B.1 范围

本方法适用于泥质岩中伊利石矿物的结晶度测定。

B.2 表征

用自然定向片 (N) 谱图上的 $10 \times 10^{-1} \text{nm}$ 峰的半高宽加以表征, 称为 Kubler 指数 $K.I$, 单位为 ($^{\circ}$) ($\Delta 2\theta$)。

B.3 测定

B.3.1 按 SY/T 5163—1995 要求分离粘土、制备样品并作出 X 射线谱图。

B.3.2 在 N 谱图上用相应软件直接测定 $10 \times 10^{-1} \text{nm}$ 峰的半高宽。

B.4 应用

对于成岩伊利石, 其结晶度与成岩及变质作用有以下关系:

$$\begin{array}{ll} K.I > 0.42^{\circ}(\Delta 2\theta) & \text{早—中成岩阶段} \\ 0.25^{\circ}(\Delta 2\theta) < K.I < 0.42^{\circ}(\Delta 2\theta) & \text{晚成岩阶段} \\ K.I < 0.25^{\circ}(\Delta 2\theta) & \text{浅变质带} \end{array}$$
