

云南兰坪—思茅盆地江城勐野井钾盐矿床 SHK4 孔 含盐系粘土矿物特征及其成钾环境指示意义

苗卫良^{1,2)}, 马海州¹⁾, 张西营¹⁾, 张玉淑^{1,2)}, 李永寿^{1,2)}

1)中国科学院青海盐湖研究所盐湖资源与化学重点实验室, 青海西宁 810008;

2)中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要: SHK4 孔揭示了晚白垩世含盐系勐野井组(K₂me)地层, 根据岩性特征将该孔划分为三个粘土矿物单元, 依次反映了从淡化期到成盐期再到淡化期的转换过程。单元 I 粘土矿物主要为伊利石(70.6%)和高岭石(26.7%), 以及极少量的绿泥石(2.7%)。处于高盐度环境下的单元 II 沉积物粘土矿物主要为伊利石(53.6%)和绿泥石(46.4%)。而这一时期物源区面积的急剧减小在一定程度上改变了粘土矿物的输入类型。单元 III 的粘土矿物主要为伊利石(44.5%)、绿泥石(41.8%)和高岭石(10.7%)。另外粘土矿物组合与沉积过程中的卤水演化程度有着良好的对应关系, 表明富 K、Mg 的高盐度环境对粘土矿物的形成转化应具有一定的制约作用。考虑到含盐系地层发育时研究区的地质构造背景, 以及 SHK4 孔伊利石结晶度(平均 0.35°Δ2θ)与化学指数(>0.5)的特征, 认为埋藏成岩作用对 SHK4 孔粘土矿物的形成也具有一定程度的影响。

关键词: 含盐系; 粘土矿物分析; 高盐度环境; 晚白垩世; 兰坪—思茅盆地

中图分类号: P578.967; P578.962 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2013.05.04

Clay Mineral Characteristics of Salt Sequence in Drill Hole SHK4 of the Mengyejing Potassium Deposit of Jiangcheng, Lanping-Simao Basin, Yunnan Province, and Their Sylvite-forming Significance

MIAO Wei-liang^{1,2)}, MA Hai-zhou¹⁾, ZHANG Xi-ying¹⁾, ZHANG Yu-shu^{1,2)}, LI Yong-shou^{1,2)}

1) Key Laboratory of Salt Lake Resources and Chemistry, Qinghai Institute of Salt Lakes,
Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008;

2) Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: This paper made a detailed study of clay minerals in salt-bearing strata from drill hole SHK4 located in the Jiangcheng potassium salt basin in the south of Yunnan Province. The authors attempted to reveal the distribution of clay mineral assemblage and its influencing factors, and the significance of these factors for salt (potash) formation. According to the lithology and deposition process, the sequence can be subdivided into three clay mineral units that reflect the transition from dilute phase to salt-forming period and dilute phase. Unit I is characterized mainly by illite (70.6%) and kaolinite (26.7%) with minor amounts of chlorite (2.7%), indicating strong chemical weathering under the condition of hot and rainy climate. The sediments of Units II in the hypersaline environment with mainly illite (53.6%) and chlorite (46.4%) represent a hot arid climate. The main source area also decreased sharply in this period, and this situation to some extent changed the type of clay minerals. Minor amounts of kaolinite (10.7%) and large amounts of illite (44.5%) as well as chlorite (41.8%)

本文由国家“973”计划项目第四课题“兰坪—思茅新生代残留盆地成钾条件、机理和后期演化”(编号: 2011CB403004)资助。

收稿日期: 2013-04-24; 改回日期: 2013-07-10。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 苗卫良, 男, 1980 年生。在职博士研究生, 助理研究员。长期从事沉积学及沉积地球化学方面的研究, 近年来主要探讨盐湖碎屑沉积及其演化方面的问题。通讯地址: 810008, 青海省西宁市新宁路 18 号。E-mail: weiliangmiao@gmail.com。

appear in Units III, suggesting the intensification of chemical weathering. In addition, good correspondence between the clay mineral assemblage and the brine evolution of SHK4 indicates that the hypersaline environment (rich in K, Mg) had certain restriction on the formation and transformation of clay minerals. Besides, based on the geological structure background of the salt forming period and the characteristics of illite crystallinity (an average of $0.35^\circ\Delta 2\theta$) and chemical index (>0.5), the authors hold that the burial diagenesis also had some effect on clay formation.

Key words: salt-bearing strata; analysis of clay minerals; hypersaline environment; late Cretaceous; Lanping-Simao Basin

粘土矿物是对环境比较敏感的含水层状硅酸盐矿物,作为风化作用产物的终端,长期以来在古气候与古环境研究及物源演化研究等方面取得了诸多重要的成果(Chamley, 1989; Petschick et al., 1996; Ehrmann, 1998; Liu et al., 2007a, b, 2009; 付正等, 2008)。因其晶体结构与晶体化学方面的特殊性,粘土矿物大多具有很强的阳离子交换能力以及富水性,致使沉积地层中粘土矿物的稳定存在与介质的组分和组分浓度、pH、Eh、温度、盐度等都有关(徐昶, 1993),即地层中的粘土矿物种类、矿物组合及化学成分在一定程度上会受介质性质的影响。尤其对于含盐系沉积层序而言,因粘土矿物在沉积期间其孔隙内充满不同浓缩程度的卤水,在水-岩作用过程中就有可能发生各类化学反应而形成不同的粘土矿物组合。徐昶(1990, 1993)通过对中国西北地区现代盐湖环境的粘土矿物进行研究,发现盐湖粘土矿物中存在转变或自生的成因类型,且在不同的成盐阶段存在不同的粘土矿物组合。而曲一华等(1998)通过对兰坪—思茅盆地含盐系地层进行粘土矿物方面的详细研究,也得出了类似的结论。可见,含盐系中的粘土矿物种类与矿物组合除主要受古气候条件与区域地质背景的控制外,沉积介质的物理化学性质也会对其产生重要的影响。故通过此类粘土矿物的研究可对盐类矿床的沉积环境及成因类型进行探讨,同时也在一定程度上也可作为钾盐矿床的找矿标志之一(曲一华等, 1998)。本文对勐野井矿区内一个完整成盐旋回的钻孔岩心样品(SHK4 孔)进行了详细的粘土矿物分析,并据此对研究区不同成盐阶段内的粘土矿物特征及其演化规律进行了探讨,为深入认识研究区钾盐矿床的成矿机制提供依据。

云南江城勐野井钾盐矿床是我国唯一的古代固体钾盐矿床,在构造区划上它与印支板块南部蕴含丰富固体钾盐资源的呵叻盆地相互毗邻,二者同为怒江—澜沧江、金沙江—哀牢山深大断裂系所夹持(图 1)。而据前人研究(Raksaskulwong et al., 2010; Hasegawa et al., 2010; 袁秦等, 2013; 秦占杰等, 2013; 高翔等, 2013),江城勐野井组(K_2me)含盐系

地层的成盐时代与呵叻盆地中相应的马哈撒拉堪组(Maha Sarakham Fm.)塔贡组(Thangon Fm.)含盐系地层基本相同,表明二者成盐期以来的古地理环境是类似的。此外经钻孔岩心观察,江城勐野井组(K_2me)含盐系地层不整合覆盖于扒沙河组(K_1p)长石石英砂岩地层之上,二者间存在明显的冲刷不整合面,这与老挝万象盆地的钻孔情况也极为相似(图 2c, d)。以上表明江城勐野井地区的含盐系地层与呵叻盆地间可能具有一定成因上的联系,通过前者的深入研究对了解两地的成盐机制及二者间的对比分析均具有重要意义。

矿区主要出露地层由老至新为白垩系景星组(K_1j)地层单元,代表岩性以砂岩、粉砂岩及杂色泥岩互层为主;曼岗组(K_1m)地层单元,代表岩性以砂岩、粉砂岩互层为主,扒沙河组(K_1p)地层单元,以长石石英砂岩为主;勐野井组(K_2me)地层单元,泥砾岩、膏盐岩及泥岩互层为主。矿区范围内断层较为发育,南部发育有飞来峰,应为大范围的推覆构造运动所致(图 1)。

研究钻孔(SHK4)位于勐野井矿区中部未受较强构造运动影响的部位(图 1),因区内第三系地层普遍遭受剥蚀,盆地内普遍缺失等黑组(E_1d)及勐腊组(E_{2-3m})地层,由第四系地层直接不整合覆盖于勐野井组(K_2me)地层之上。此外钻孔在约 302 m 的深度钻穿了含盐系地层,与下部扒沙河组(K_1p)长石石英砂岩相呈不整合接触,接触面显示为冲刷构造(图 2c)。钻孔岩相上具明显的旋回性特征,自下而上总体上为碎屑岩相—盐岩相—钾石盐/盐岩交互相—盐岩相/膏盐相—碎屑岩相。其中碎屑岩相多以棕红色不等粒泥砾岩为主,泥砾成分以棕红色/灰绿色泥质、粉砂质为主,部分层段可见粒状镜铁矿分布;盐岩相以灰白/灰黑色结晶石盐岩为主,质纯且水平纹层较为发育(图 2a),纹层面上可见粘土薄膜,代表石盐的原生性较好;钾盐/盐岩交互相以桔红色细粒状钾盐脉、灰白色石盐细脉及棕红色泥砾岩不均匀交互产出为主(图 2b),此外靠近钾盐段的石盐多呈桔红色,可能具有一定的指示意义。

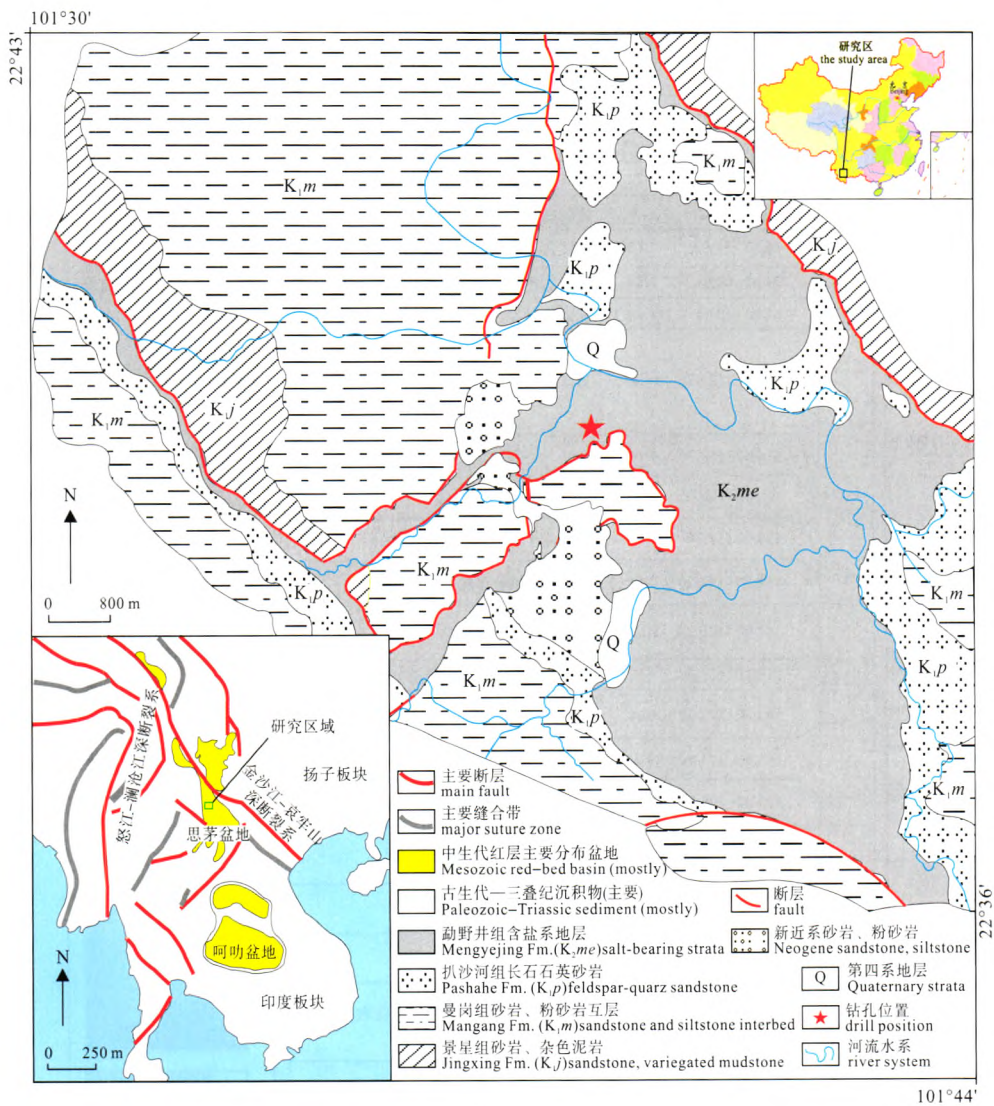


图 1 研究区地理位置及地质简图(据 Tabakh et al., 2003; Cao et al., 2011; 郑智杰, 2012 修改)
Fig. 1 Location and simplified geological map of the study area
(modified after Tabakh et al., 2003; Cao et al., 2011; ZHENG, 2012)

1 材料与方法

根据 SHK4 孔岩性分布对其进行了分割取样工作, 样品以碎屑岩为主, 同时对有泥砾岩分布的层段也分别予以取样, 而对于质纯的石盐/膏盐段因无法获取粘土分析样品而予以放弃。本次共获取粘土分析样品 53 个, 其中上覆第四系对比样品 1 个, 重复对比样品 2 个, 含盐系地层有效粘土分析样品 50 个。

对样品预处理时首先将其同 0.5% 的稀盐酸反应去除碳酸钙, 而后用去离子水清洗至接近中性, 再使样品继续同双氧水反应去除样品中的有机质成分, 之后继续用去离子水反复清洗, 直到具有抗絮凝作用发生。根据 Stokes 原理所确定的沉淀时间, 将 <2 μm 的颗粒吸出并离心去除水分, 用滴片的方法制成定向薄片, 而后进行粘土矿物组合的(<2 μm)测

试分析。本次样品制备和测试均在中科院青海盐湖研究所盐湖地质与环境重点实验室完成。测试采用 PANalytical X'Pert PRO 衍射仪(XRD), CuKα 辐射, Ni 滤波器, 管压 45 kV, 管流 40 mA, 分别对自然条件、乙二醇条件(24 小时)、加热条件(490℃烘箱中加热 2 小时)预处理过的样品薄片进行测试。

粘土矿物的鉴定和解释主要依据三种测试条件下获得的 XRD 叠加波谱的综合对比(Liu et al., 2007b, 2009)(图 3), 每个波峰参数的半定量计算使用 MacDiff 软件(Petschick, 2000)在乙二醇曲线上进行。粘土矿物的相对含量主要使用(001)晶面衍射峰的面积比, 蒙脱石(含伊利石/蒙脱石随机混层矿物)采用 1.7 nm(001)晶面, 伊利石采用其 1 nm(001)晶面, 高岭石(001)和绿泥石(002)使用 0.7 nm 叠加峰, 他们的相对比例通过拟合 0.357 nm/0.354 nm 峰面积比确

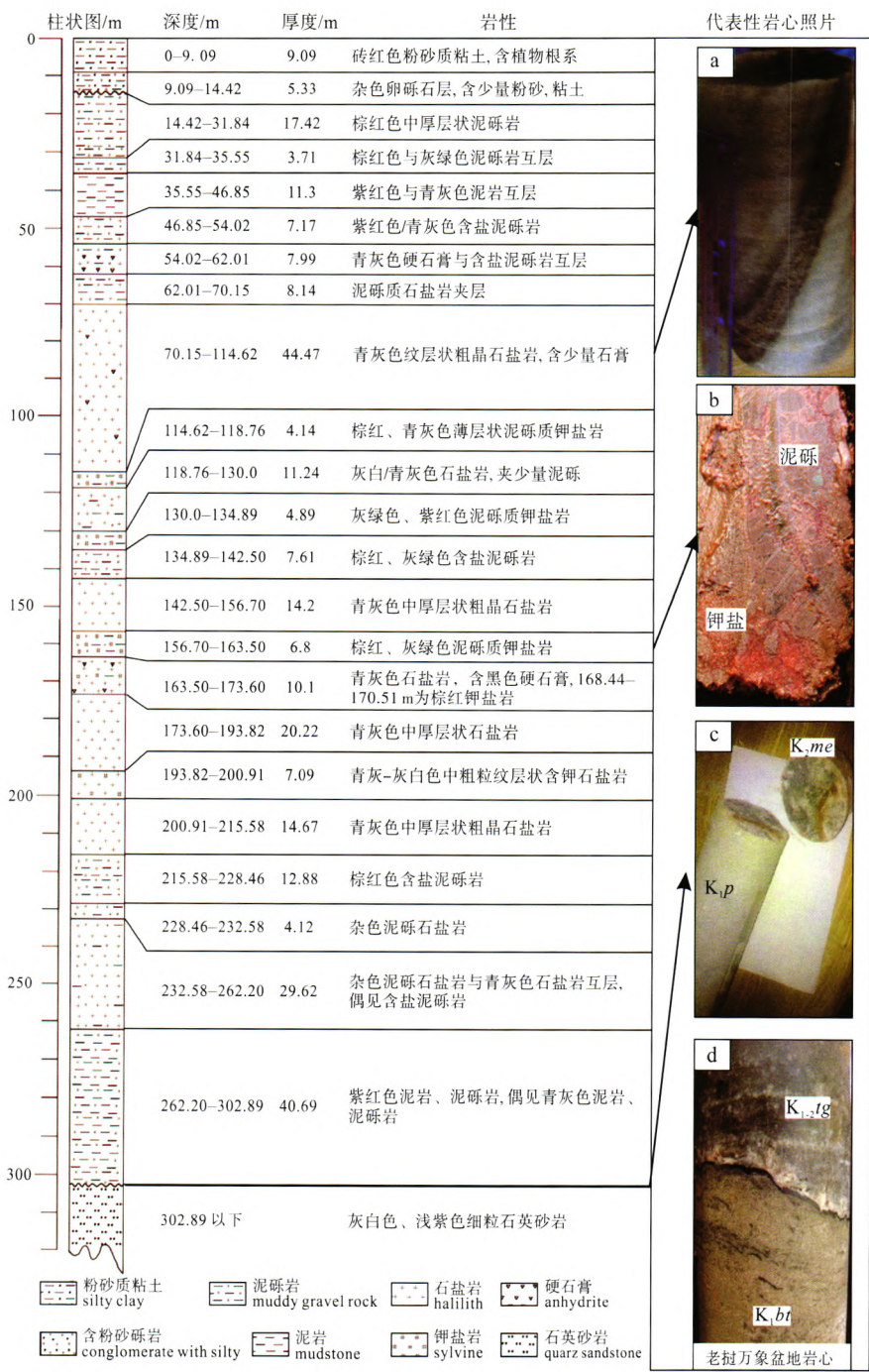


图 2 SHK4 孔岩芯编录与岩性描述

Fig. 2 Lithologic description and core logging of drill hole SHK4

a-青灰色纹层状石盐岩，原生纹层极为发育，为后期断裂所截；b-棕红色泥砾质钾盐岩，泥砾呈次角砾状，橘红色钾石盐沿泥砾空隙不均匀分布；c-SHK4 孔含盐系底部不整合面，下部为早白垩统扒沙河组地层；d-老挝万象盆地钻孔所揭示的含盐系底部不整合面，上部为早—中白垩统塔贡组(Thangon Fm.)地层，下部为早白垩统班达拉组(Ban Thalut Fm.)地层，下部地层岩性与扒沙河组地层相似

a-gray laminated salt rock, primary laminae well developed and cut by later fractures; b-reddish brown potassium salt rock with muddy gravel, the muddy gravel existent with secondary brecciated structure, orange red sylvite unevenly distributed along the muddy gravel gap; c-unconformity at the bottom of salt sequence, the underlying strata being Pashahe Formation of Early Cretaceous; d-unconformity at the bottom of salt sequence of Vientiane basin, Laos, the upper strata being Thangon Formation of Early-Middle Cretaceous, and the underlying one being Ban Thalut Formation of Early Cretaceous, the lithology of underlying one same as Pashahe Formation

定。同时，根据乙二醇曲线计算出伊利石的矿物学特征，伊利石化学指数为 0.5 nm/1.0 nm 峰面积比，比值大于 0.50 为富 Al 伊利石(白云母)，代表强烈的水解作用；比值小于 0.15 时代表富 Mg-Fe 伊利石(黑云母)，为物理风化结果(Petschick et al., 1996)。伊利石结晶度为 1 nm 处的半峰宽，低值代表结晶度

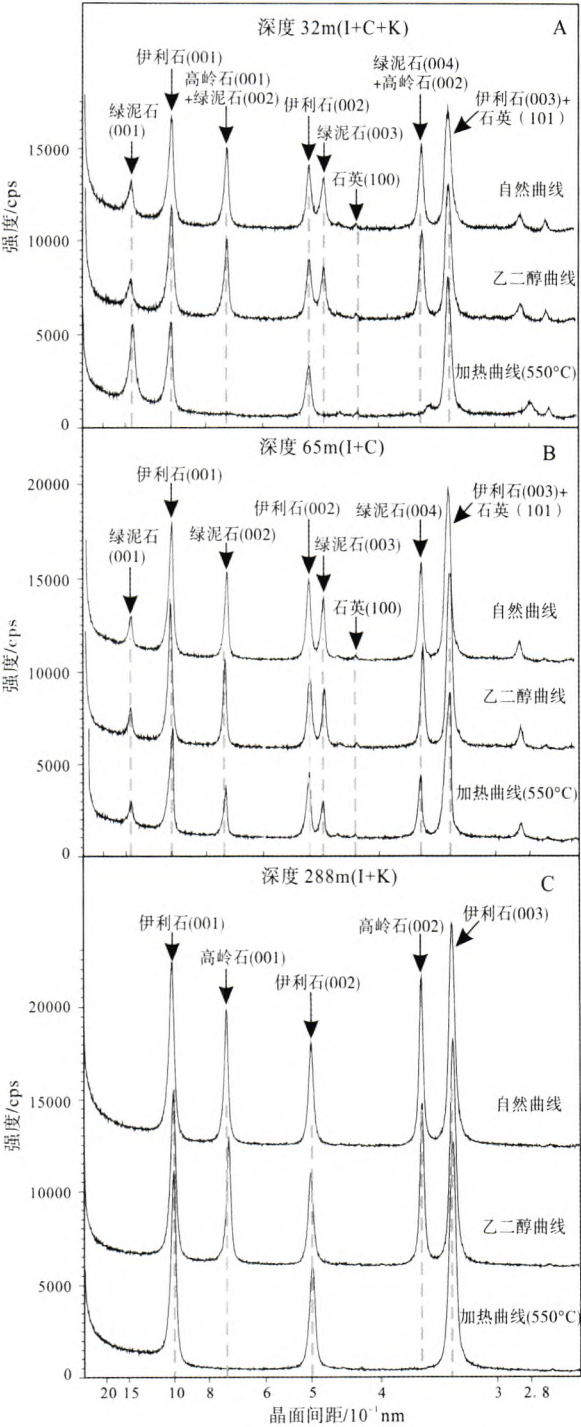


图3 SHK4孔不同成盐阶段典型样品的X射线衍射叠加波谱

Fig. 3 XRD spectra of typical samples of different salt-forming phases in drill hole SHK4
A-单元I典型样品的X射线衍射叠加波谱, 粘土矿物组合为伊利石+绿泥石+高岭石型; B-单元II典型样品的X射线衍射叠加波谱, 粘土矿物组合为伊利石+绿泥石型;
C-单元III典型样品的X射线衍射叠加波谱, 粘土矿物组合为伊利石+高岭石型
A-XRD spectrum of typical sample of Unit I, clay mineral assemblage consisting of illite, chlorite and kaolinite;
B-XRD spectrum of typical sample of Unit II, illite and chlorite constituting the main clay mineral assemblage;
C-XRD spectrum of typical sample of Unit III, illite and kaolinite making up the main clay mineral assemblage

高, 指示陆地物源区水解作用弱, 为干冷的气候条件(Ehrmann, 1998; Liu et al., 2007a)。

2 结果

XRD 分析结果显示, 包括淡化期、成盐期及成钾期的岩心样品中, 粘土矿物均以伊利石为主, 其含量一般在 17.7%~90.3%之间, 平均为 55.5%; 同时绿泥石与高岭石按成盐阶段呈不均等分布, 绿泥石主要分布于初始成盐期至成盐期末, 其含量一般在 4.8%~69.9%之间, 平均为 36.1%; 高岭石主要分布于本钻孔的淡化期阶段, 其含量一般在 0%~59.4%间, 平均为 7.7%。包括淡化期与成盐期, 样品的伊利石化学指数一般变化为 0.45~1.25, 多数大于 0.50, 代表了多为富 Al 型伊利石; 而伊利石结晶度一般变化为 0.3°~0.63°Δ2θ, 不考虑第四纪的参照样品值, 该孔伊利石结晶度平均值为 0.35°Δ2θ, 表明伊利石的结晶程度很好(表 1)。

依据钻孔岩心显示的不同成盐阶段及粘土矿物组合分布规律, 将含盐系沉积层序自下而上划分为三个单位分别进行阐述(图 4)。单元 I 为初始淡化期, 孔深范围为 262~302 m, 其粘土矿物组合以伊利石+高岭石(I+K)为主(图 3a), 伊利石相对含量变化一般为 40.7%~88.5%, 平均为 70.6%, 并随着深度变浅而递减; 高岭石相对含量变化一般为 2.7%~59.4%, 平均为 26.7%, 其随孔深的变化趋势与伊利石类同。该阶段伊利石化学指数一般变化为 0.48~0.63, 表明以富 Al 伊利石为主, 代表了当时物源区较强的水解作用, 而伊利石结晶度一般变化为 0.32°~0.39°Δ2θ(表 1), 表明该阶段伊利石的结晶程度高。

单元 II 为成盐成钾期, 孔深范围为 47~262 m, 包括开始咸化阶段至成盐成钾期, 其间因含三段纯石盐岩段而无法取样, 造成粘土曲线间断。该期粘土矿物组合以伊利石+绿泥石(I+C)为主(图 3b), 而基本无高岭石分布。该阶段伊利石相对含量变化一般为 30.1%~72.3%, 平均为 53.6%, 较单元 I 低, 且随孔深变小, 本期伊利石相对含量由开始时的逐渐减小过渡到渐增, 并在成钾期步入最小值阶段; 而绿泥石相对含量变化一般为 27.7%~69.9%, 平均为 46.4%, 其随孔深的变化规律与伊利石基本呈镜像对称关系, 这表明伊利石与绿泥石的相对含量变化对成盐成钾环境的演化有一定程度的响应。该阶段伊利石化学指数一般变化为 0.46~0.79, 表明多为富 Al 伊利石, 代表了物源区强烈的水解作用过程; 而

伊利石结晶度一般变化为 $0.31^{\circ}\sim 0.44^{\circ}\Delta 2\theta$ (表 1), 指示了较好的伊利石结晶程度。

单元Ⅲ为末次淡化期, 孔深范围为 17~47 m, 其粘土矿物组合主要以伊利石+绿泥石+高岭石(I+C+K)为主(图 3c)。本期伊利石相对含量变化一般为 17.7%~69.5%, 平均为 44.5%, 为三个单元中的最低区, 同时随孔深变浅, 伊利石相对含量大幅降低, 至孔深 32 m 处开始又开始猛增, 呈一剧烈变化期; 而绿泥石相对含量变化一般为 4.8%~67.2%, 平均为 41.8%, 其变化趋势与伊利石类同; 此外高岭石含量变化一般为 0%~26.4%, 平均为 10.7%, 在孔深 32 m 处高岭石相对含量达到高峰, 并随孔深变浅而逐渐递减。同时本期伊利石化学指数一般变化为 0.45~1.25, 也同样在 32 m 处达到一个高峰, 表明这一阶段物源区可能遭受着强烈的水

解作用; 而伊利石结晶度一般变化为 $0.30^{\circ}\sim 0.39^{\circ}\Delta 2\theta$ (表 1), 依旧指示了较好的伊利石结晶程度。

3 讨论

3.1 粘土矿物组合的影响因素及地质意义

通过对比不同成盐阶段所对应的粘土矿物组合变化规律, 发现随着成盐阶段不同, 粘土矿物的相对含量也随之变化, 二者间有着很好的对应关系, 同时伊利石结晶度与伊利石化学指数在一定程度上也有所响应。这表明本孔粘土矿物的分布模式除与源区岩性, 搬运、沉积过程以及后期成岩改造有关外, 与成盐期的高盐度环境效应也有着密切关系。

蒙脱石与高岭石大多是由母岩的化学风化作用

表 1 SHK4 孔不同成盐阶段平均粘土矿物含量与特征指数
Table 1 Average concentrations and characteristic indexes of clay minerals at different salt-forming stages in drill hole SHK4

时代	成盐阶段	样品数	伊利石/%	σ_I	绿泥石/%	σ_C	高岭石/%	σ_K	伊利石化学指数	σ_{ICI}	伊利石结晶度/ $\Delta 2\theta$	σ_{IC}	粘土矿物组合
Q	—	1	90.3	—	5.5	—	4.2	—	0.52	—	0.63	—	I+C+K
K ₂ me	淡化期	12	44.5	18.7	41.8	16.3	10.7	6.1	0.74	0.23	0.35	0.025	I+C+K
	成盐期	29	53.6	11.1	46.4	11.1	0	—	0.58	0.07	0.35	0.031	I+C
	淡化期	10	70.6	12.5	2.7	10.0	26.7	15.5	0.54	0.04	0.35	0.027	I+K

注: σ_I 、 σ_C 、 σ_K 、 σ_{ICI} 、 σ_{IC} 分别代表伊利石、绿泥石、高岭石、伊利石化学指数以及伊利石结晶度值的标准偏差。

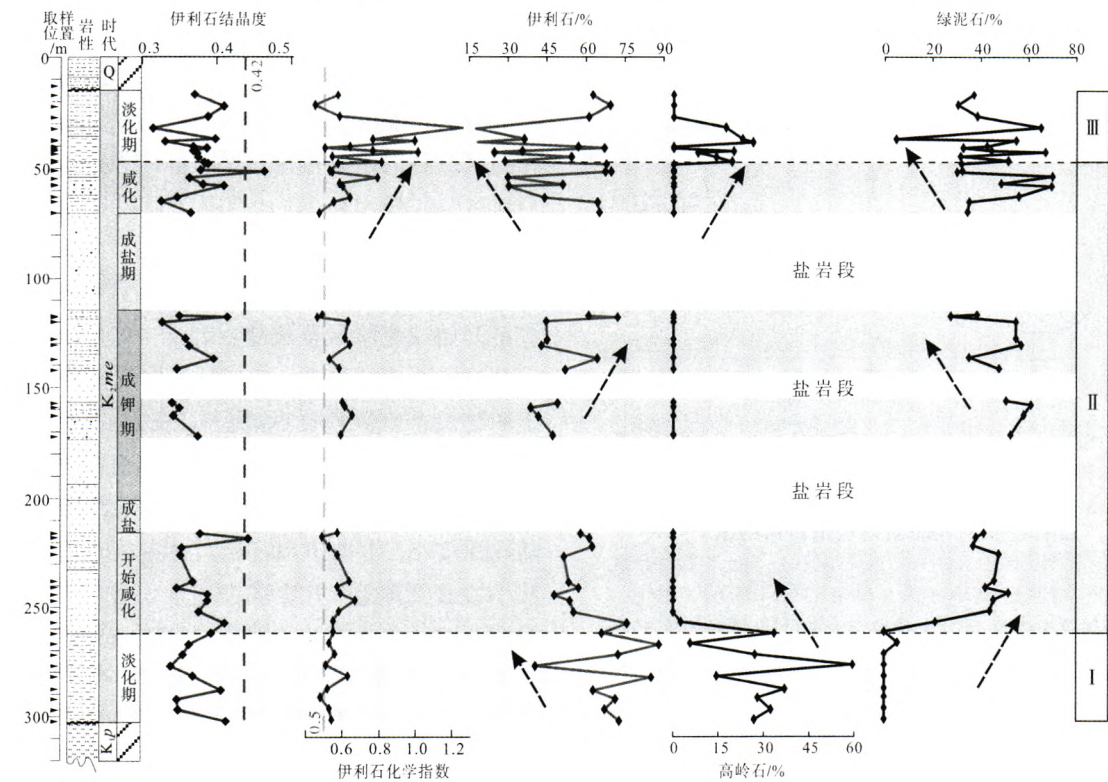


图 4 SHK4 孔碎屑沉积中粘土矿物的相对百分含量及其矿物学特征的时空变化

Fig. 4 Temporal variability of clay content and clay mineralogy in the carbonate-free<2 μm size of clastic sediments from core of drill hole SHK4

而形成(Chamley, 1989), 而伊利石、绿泥石等矿物则是经蒙脱石与高岭石等在一定的地质条件下转换而来(Merriman, 2005), 故 SHK4 孔岩心中高岭石的存在应是物源区化学风化过程中强烈水解作用的结果。单元 I 含有较高含量的高岭石成分, 且其泥砾成分较为单一但粒度分布不均, 呈角砾-次角砾状结构, 表现出水动力条件较强的近源搬运特征。同时伊利石化学指数表现出明显的强水解作用特征, 因此在不考虑成岩作用的前提下, 单元 I 沉积期应为炎热多雨的气候条件, 这与前人研究的晚白垩时期的气候条件是相符的。从单元 I 过渡到单元 II 时, 高岭石含量与伊利石含量均快速减少, 而绿泥石含量则相应增加, 形成一个突变, 这可能是因为湖盆水体咸化程度进一步加深, 导致高岭石能够稳定存在的弱酸性环境不复存在(Chamley, 1989), 并在一定条件下主要向绿泥石发生转变(详见后述)。同时气候炎热干旱也使盆地水域面积急剧减小, 盆地物源区域快速收缩, 表现为沉积物中粘土矿物组合的显著差异。进入单元 II 沉积期后, 在持续的炎热干旱气候条件下, 盆地内水体不断浓缩咸化, 最终达到析出钾石盐的高盐度环境, 而此过程中湖盆物源区范围也进一步缩减。同时因受高盐度环境影响逐渐加剧(Honty et al., 2004), 伊利石与绿泥石间的相对比例也发生了明显变化, 这可能也是造成伊利石结晶度良好的主要原因。此外本阶段伊利石化学指数依旧表现为代表水解作用发育的高值, 这可能是高盐度环境中高 K^+ 浓度的卤水介质促进了伊利石沿优势晶面(001)生长的原因。

单元 II 晚期进入单元 III 淡化阶段, 气候又开始变的潮湿多雨, 湖泊面积逐渐扩大且物源区水解作用加剧(伊利石化学指数显著增大), 使得高岭石含量渐增而伊利石与绿泥石含量渐少。在后期埋藏成岩过程中, 受埋藏温度及孔隙高浓度卤水等的影响, 伊利石结晶度依旧良好。进入第四纪后, 粘土矿物以伊利石为主, 仅含少量高岭石与绿泥石(表 1), 表明其物源区与勐野井含盐系地层沉积时又不尽相同, 同时其伊利石化学指数和高岭石的分布特征均表现出较强的水解作用特点, 这是暖湿古气候条件的体现。

另据 Kübler(1967)提出的成岩作用阶段划分标准, 即 KI(即 IC 值)处于 $0.42^{\circ}\sim 0.25^{\circ}\Delta 2\theta$ 之间时为埋藏变质阶段(也称近地带, $200\sim 300^{\circ}\text{C}$)(Jaboyedoff et al., 2001), SHK4 全孔均应达到了埋藏变质阶段。考虑到该孔的孔深、岩性特征以及地层年代, 我们认

为这种认识并不可靠。伊利石结晶度的影响因素除了温度外, 还包括流体压力、应力、时间、寄主岩石、伊利石矿物组分及实验条件等诸多因素(Warr et al., 1990; 张立飞, 1994)。SHK4 孔地处我国三江造山带内, 印支期以来区内构造运动活跃, 从而造成陆块内部应力相对较大; 同时该孔基本沉积于高盐度环境中, 介质中阳离子浓度普遍很高, 尤其是高浓度的 K^+ 会在很大程度上影响到伊利石的结晶程度(Honty et al., 2004)。因此, 本孔伊利石结晶度普遍良好的原因除了埋藏温度的影响外, 构造应力与高盐度环境效应也应发挥了重要作用。

此外, 研究表明(刘志飞等, 2007)未遭受或受后期环境因素影响较小的沉积物的伊利石化学指数与伊利石结晶度值能较好的协同反映物源区的风化水解作用特征, 从代表物理风化作用为主的富 Fe-Mg 型伊利石过渡到代表强烈水解作用的富 Al 型伊利石, 伊利石结晶度与化学指数均会呈现出增大的趋势。通过对研究区岩心样品的伊利石化学指数和伊利石结晶度进行对比分析(图 5), 发现单元 I 与单元 II 的伊利石化学指数与结晶度相关度极低, 表明这两个单元的沉积物受后期埋藏成岩作用和高盐度环境影响显著; 而单元 III 的伊利石化学指数与结晶度则表现出反相关性, 这也与伊利石参数正常的指示意义相悖。充分表明三个沉积单元在沉积过程后期均受到了高盐度卤水, 埋藏成岩作用, 乃至构造应力的强烈影响。

因此, SHK4 孔的粘土矿物组合特征叠加了研究区的古环境特征、埋藏成岩作用以及高盐度环境的共同影响, 造成其在不同的沉积阶段有着各不相同的特征及地质意义。

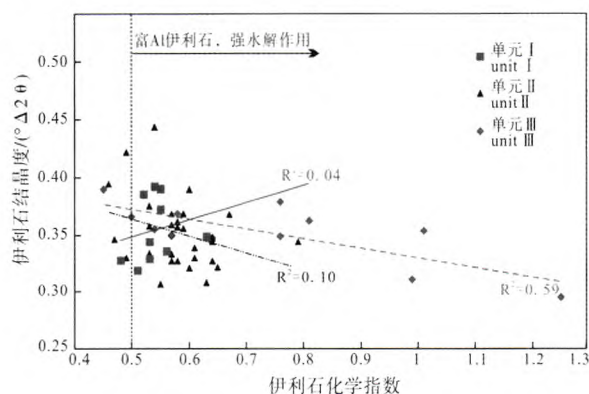


图 5 SHK4 孔不同成盐阶段碎屑沉积物的伊利石化学指数和结晶度对比

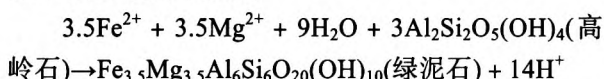
Fig. 5 Comparison of chemical index and crystallinity of illite of clastic sediments at different salt-forming stages in drill hole SHK4

3.2 粘土矿物组合对成钾环境的指示

世界钾盐资源主要集中在少数国家,作为农业大国的中国却极为欠缺,因此加强我国古今盐盆地找钾研究与勘查,并提出有效的找钾标识对缓解我国钾盐资源紧缺的现状极为重要(郑绵平等, 2012)。而对环境介质物理化学条件极为敏感且在近地表沉积地层中较为稳定的粘土矿物及其组合作为指示卤水浓缩程度乃至成盐成钾的指标无疑具有独特的优势。盐湖碎屑沉积物中的粘土矿物及其组合在卤水介质浓缩过程中会发生一定程度的变化,这点已为众多中外学者的相关研究所证实(Luther et al., 1988; 徐昶, 1990, 1993; Bauer et al., 1998; Velde et al., 1999; Honty et al., 2004; Savage et al., 2010),那么针对卤水浓缩的不同阶段,沉积物中的粘土矿物组合究竟是如何响应的呢?通过对 SHK4 孔成盐期卤水浓缩的不同阶段与相应的粘土矿物组合及其产出岩性进行综合对比,发现从淡化期到成盐期,粘土矿物组合总体上从伊利石+绿泥石+高岭石(I+C+K)型逐渐过渡到伊利石+绿泥石(I+C)型(表 1),指示了卤水的逐渐浓缩;同时在成盐期阶段(单元 II)的钻孔剖面上有规律地表现出绿泥石含量随卤水浓缩程度增高而增大的现象,并在出现钾盐矿化层位的青灰色、灰绿色泥砾岩中其含量增大到接近或超过伊利石含量的程度。这表明总出现于青灰色钾盐岩和灰绿色泥砾钾盐岩中的绿泥石+伊利石(C+I)组合(绿泥石的质量分数大于伊利石)具有指示工业钾盐矿层的特殊意义。由图 6 可见,上下两个淡化期内,伊利石总体含量较高,而绿泥石含量较低,而随着卤水开始浓缩并进入成盐阶段,伊利石含量开始出现下降的趋势而绿泥石则逐渐增加,二者间的这种趋势在卤水浓缩的最高阶段,即出现钾盐盐段时达到了顶峰,即表现为伊利石含量的低值与绿泥石含量的高值。因此,含盐系碎屑岩中的绿泥石+伊利石(C+I)组合/伊利石+绿泥石(I+C)组合可在一定程度上指示卤水的浓缩程度,从而成为有效的找钾标志。这一研究成果与曲一华等(1998)的相关研究是极为相符的。

通过对粘土矿物的转化序列的研究可知(Merriman, 2005),作为风化作用端元产物的伊利石主要形成于富 Na^+ 、 K^+ 环境,而绿泥石则主要形成于富 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 环境,那么在卤水逐渐浓缩的过程中,环境介质中的 Na^+ 和 K^+ 富集程度会越来越高,这种利于生成伊利石的环境中又为何会出现绿泥石相对含量升高和伊利石相对含量降低的情况?结合前人

的研究成果(曲一华等, 1998),同时通过对绿泥石 XRD 图谱和 SHK4 孔岩心样品的详细观察分析,我们发现形成于钾盐层段中的绿泥石多为富镁绿泥石,且成盐成钾阶段中伴生有薄板状菱镁矿和自生黄铁矿等矿物,充分表明成钾期的卤水介质是富 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 的。同时由图 4 可知,单元 I 阶段,沉积物中主要的粘土矿物为伊利石和高岭石,在进入单元 II 成盐期时,高岭石开始急剧减少并伴随绿泥石的迅速增加和伊利石的轻度降低,这说明沉积物中高岭石在成盐成钾期的碱性且富 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 环境中可能按下面所列的反应式发生了主要向绿泥石转化的反应,从而造成绿泥石+伊利石(C+I)组合对卤水浓缩和成钾环境表现更为敏感。



但该反应发生的驱动机制目前依旧不甚明了,还有待于进一步研究。

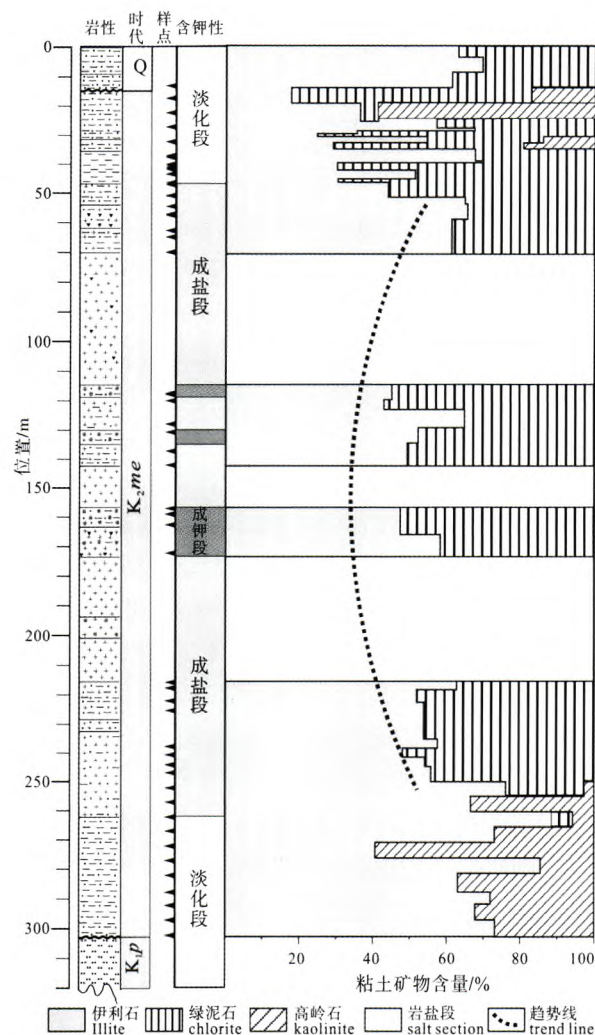


图 6 SHK4 孔粘土矿物含量与分布趋势图

Fig. 6 Clay mineral content and its distribution trend in drill hole SHK4

4 结论

综上所述, 云南江城勐野井矿区钻孔岩性样品的粘土矿物组合按不同的成盐阶段可分为三段: 单元 I 起始淡化期粘土矿物组合主要由伊利石(40.7%~88.5%)和高岭石(2.7%~59.4%)组成, 代表了炎热多雨气候条件下强烈的化学风化作用; 单元 II 成盐成钾期粘土矿物组合由伊利石(30.1%~72.3%)和绿泥石(27.7%~69.9%)组成, 代表着炎热干旱的气候条件; 单元 III 末次淡化期粘土矿物组合由伊利石(17.7%~69.5%)、绿泥石(4.8%~67.2%)和高岭石(0~26.4%)组成, 代表在这一时期开始由前一阶段的干旱转为潮湿, 同时化学风化作用开始逐渐增强。同时, 伊利石化学指数值大多在 0.5 以上, 表示为化学风化条件下形成的富 Al 伊利石; 而伊利石结晶度均值为 $0.35^{\circ}\Delta 2\theta$, 表示钻孔岩心中的伊利石结晶程度均很高。分析认为, 单元 I 与单元 III 两个沉积段的物源区在相应时期可能处于炎热多雨的气候条件下, 造成了物源区较强的风化水解作用; 而单元 II 的物源区因干旱炎热的气候条件而急剧缩减, 由此造成的物源输入的变动应是不同沉积单元间粘土矿物组合差异的一个重要原因, 同时这一时期的高盐度环境及后期埋藏成岩作用也应对这种差异的加剧有着重要作用。

此外, 从江城勐野井矿区钻孔岩心(SHK4)的粘土矿物垂向分布特征来看, 成盐成钾期主要发育伊利石+绿泥石(I+C)的粘土矿物组合, 表明这一组合可有效指示卤水的浓缩; 同时该阶段绿泥石相对含量随成盐成钾作用的加强而逐渐增加, 随成盐成钾作用减弱而逐渐减少, 表明绿泥石+伊利石(C+I)组合(绿泥石的质量分数大于伊利石)在一定程度上可作为有效的找钾标志。

致谢: 参加野外工作的还有中国科学院青海盐湖研究所的李斌凯、安福元、秦占杰等同志。野外调研取样期间, 得到云南江城泰裕钾肥有限公司相关领导的大力支持和帮助, 在此一并表示衷心感谢。

参考文献:

- 付正, 刘钦甫, 田威猛, 侯丽华. 2008. 海拉尔盆地贝尔凹陷兴安岭群储层粘土矿物组成及特征研究[J]. 地球学报, 29(2): 174-178.
- 高翔, 方勤方, 姚薇, 彭强, 董娟, 秦红, 邸迎伟. 2013. 云南兰坪—思茅盆地勐野井钾盐矿床物质组分对成因的指示[J]. 地球学报, 34(5): 529-536.
- 刘志飞, COLIN C, 黄维, 陈忠, TRENTESAUX A, 陈建芳. 2007. 珠江流域盆地表层沉积物的粘土矿物及其对南海沉积物的贡献[J]. 科学通报, 52(4): 448-456.
- 秦占杰, 袁秦, 魏海成, 盛淑蓉, 山发寿. 2013. 老挝甘蒙省晚白垩世农波组孢粉分析及其对成盐环境的指示意义[J]. 地球学报, 34(5): 638-642.
- 曲一华, 袁品泉, 帅开业, 张瑛, 蔡克勤, 贾疏源, 陈朝德. 1998. 兰坪-思茅盆地钾盐成矿规律及预测[M]. 北京: 地质出版社.
- 徐昶. 1990. 我国盐湖粘土矿物及其意义的初步研究[J]. 中国科学 B 辑, (3): 303-312.
- 徐昶. 1993. 中国盐湖粘土矿物研究[M]. 北京: 科学出版社: 1-208.
- 袁秦, 秦占杰, 魏海成, 盛淑蓉, 山发寿. 2013. 云南江城勐野井组钾盐成矿时代及其古环境研究[J]. 地球学报, 34(5): 631-637.
- 张立飞. 1994. 伊利石结晶度研究进展之二[J]. 地学前缘, 1(1-2): 201-202.
- 郑绵平, 张震, 张永生, 刘喜方, 尹宏伟. 2012. 我国钾盐找矿规律新认识和进展[J]. 地球学报, 33(3): 280-294.
- 郑智杰. 2012. 勐野井矿区盐物质来源及成盐时代研究[D]. 南京: 南京大学.
- BAUER A, VELDE B, BERGER G. 1998. Kaolinite transformation in high molar KOH solutions[J]. Applied Geochemistry, 13(5): 619-629.
- CAO Shu-yun, LIU Jun-lai, LEISS B, NEUBAUER F, GENSER J, ZHAO Chun-qiang. 2011. Oligo-Miocene shearing along the Ailao Shan- Red River shear zone: Constraints from structural analysis and zircon U/Pb geochronology of magmatic rocks in the Diancang Shan massif, SE Tibet, China[J]. Gondwana Research, 19: 975-993.
- CHAMLEY H. 1989. Clay Sedimentology[M]. Berlin: Springer.
- EHRMANN W. 1998. Implications of late Eocene to early Miocene clay mineral assemblages in McMurdo Sound (Ross Sea, Antarctica) on Paleoclimate and ice dynamics[J]. Paleogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology, 139: 213-231.
- FU Zheng, LIU Qin-fu, TIAN Wei-meng, HOU Li-hua. 2008. Composition and Characteristics of Clay Minerals from the Hingganling Group in the beier Deperssion of the Hailar Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 29(2): 174-178(in Chinese with English abstract).
- GAO Xiang, FANG Qin-fang, YAO Wei, PENG Qiang, DONG Juan, QIN Hong, DI Ying-wei. 2013. Genesis of the Mengyejing Potash Deposit in Lanping-Simaobasin, Yunnan: Indication from the Components of the Deposit[J]. Acta Geoscientica Sinica, 34(5): 529-536(in Chinese with English abstract).
- HASEGAWA H, IMSAMUT S, CHARUSIRI P, TADA R,

- HORIUCHI Y, HISADA K I. 2010. 'Thailand was a desert' during the mid-Cretaceous: Equatorward shift of the subtropical high-pressure belt indicated by eolian deposits (Phu Thok Formation) in the Khorat Basin, northeastern Thailand[J]. *Island Arc*, 19: 605-621.
- HONTY M, UHLIK P, ŠUCHA V, ČAPLOVIČOVÁ M, FRANCU J, CLAUER N, BIROŇ A. 2004. Smectite-to-illite alteration in salt-bearing bentonites (the East Slovak Basin)[J]. *Clay and Clay Minerals*, 52(5): 533-551.
- JABOYEDOFF M, BUSSY F, KÜBLER B, THELIN PH. 2001. Illite "Crystallinity" revisited[J]. *Clay and Clay Minerals*, 49(2): 156-167.
- KRUMM S, BUGGISCH W. 1991. Sample preparation effects on illite crystallinity measurements: grain size gradation and particle orientation[J]. *J Metamorph Geol*, 9: 671-677.
- KÜBLER B. 1967. La cristallinité de l'illite et les zones tout à fait supérieures du métamorphisme[J]. *A la Baconnière, Etages tectoniques*, 105-121.
- LIU Zhi-fei, COLIN C, HUANG Wei, CHEN Zhong, TRENTESAUX A, CHEN Jian-fang. 2007a. Clay minerals in surface sediments of the Pearl River drainage basin and their contribution to the South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(8): 1101-1111.
- LIU Zhi-fei, COLIN C, HUANG Wei, LE K P, TONG Shen-qi, CHEN Zhong, TRENTESAUX A. 2007b. Climatic and tectonic controls on weathering in South China and the Indochina Peninsula: Clay mineralogical and geochemical investigation from the Pearl, Red, and Mekong drainage basins[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 8(5): 1-18.
- LIU Zhi-fei, ZHAO Yu-long, COLIN C, SIRINGAN F P, WU Qiong. 2009. Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major-element geochemistry of river sediments[J]. *Applied Geochemistry*, 24: 2195-2205.
- LUTHER III G W, CHURCH T M. 1988. Seasonal cycling of sulfur and iron in porewaters of a Delaware salt marsh[J]. *Marine Chemistry*, 23: 295-309.
- MERRIMAN R J. 2005. Clay minerals and sedimentary basin history[J]. *European Journal of Mineralogy*, 17: 7-20.
- PETSCHICK R, KUHN G, GINGELE F. 1996. Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: sources, transport, and relation to oceanography[J]. *Mar Geol*, 130: 203-229.
- PETSCHICK R. 2000. MacDiff 4.2.2[CP]. [2013-03-22]. <http://servermac.geologie.unfrankfurt.de/Rainer.html>.
- QIN Zhan-jie, YUAN Qin, WEI Hai-cheng, SHENG Shu-rong, SHAN Fa-shou. 2013. Spore-pollen Assemblages of the Late Cretaceous Nong Bok Formation in Khammouane, Laos, and Their Environmental Significance for Salt Formation[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(5): 638-642(in Chinese with English abstract).
- QU Yi-hua, YUAN Pin-quan, SHUAI Kai-ye, ZHANG Ying, CAI Ke-qin, JIA Shu-yuan, CHEN Chao-de. 1998. Potash-forming Rules and Prospect of Lower Tertiary in Lanping-Simaoguo Basin, Yunnan[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-118(in Chinese).
- RAKSASKULWONG L, ASSAVAPATCHARA S, BAMROONGSONG P, KHAOWISET K. 2010. Continuation of the Mesozoic continental deposits across Thailand and Lao PDR[C]//Thai-Lao Technical Conference on Geology and Mineral Resources, 110-123.
- SAVAGE D, BENBOW S, WATSON C, TAKASE H, ONO K, ODA C, HONDA A. 2010. Natural systems evidence for the alteration of clay under alkaline conditions: An example from Searles Lake, California[J]. *Applied Clay Science*, 47: 72-81.
- TABAKH M E, UTHA-AROON C, WARREN J K, SCHREIBER B C. 2003. Origin of dolomites in the Cretaceous Maha Sarakham evaporates of the Khorat Plateau, northeast Thailand[J]. *Sedimentary Geology*, 157: 235-252.
- VELDE B, CHURCH T. 1999. Rapid clay transformations in Delaware salt marshes[J]. *Applied Geochemistry*, 14: 559-568.
- WARR L N, ROBINSON D. 1990. The application of the illite "crystallinity" technique to geological interpretation: a case study from north Cornwall[C]//The Annual Conference of the Ussher Society, 7: 223-227.
- XU Chang. 1990. A preliminary study on clay minerals of Saline Lakes in China and its significance[J]. *Science in China Series B*, (3): 303-312(in Chinese).
- XU Chang. 1993. Study on Clay Minerals of Saline Lakes in China[M]. Beijing: Science Press: 1-208(in Chinese).
- YUAN Qin, QIN Zhan-jie, WEI Hai-cheng, SHENG Shu-rong, SHAN Fa-shou. 2013. The Ore-forming Age and Palaeoenvironment of the Mengyejing Formation in Jiangcheng, Yunnan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(5): 631-637(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Li-fei. 1994. Research progress of Illite crystallinity II[J]. *Earth Science Frontiers*, 1(1-2): 201-202(in Chinese).
- ZHENG Mian-ping, ZHANG Zhen, ZHANG Yong-sheng, LIU Xi-fang, YIN Hong-wei. 2012. Potash Exploration Characteristics in China: New Understanding and Research Progress[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(3): 280-294(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Zhi-jie. 2012. Research of the Origin of Salt Deposits and the Salt Forming Era in Jiangcheng Mengyejing[D]. Nanjing: Nanjing University(in Chinese with English abstract).