

doi:10.3799/dqkx.2016.501

奥连特盆地白垩系海绿石成因类型及沉积地质意义

阳孝法¹, 谢寅符¹, 张志伟¹, 马中振¹, 郭纯恩², 周玉冰¹, 王丹丹¹, 刘亚明¹, 赵永斌¹

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
2. 中国石油拉美公司, 加拉加斯 999188

摘要:厄瓜多尔奥连特盆地白垩系 Napo 组 UT 段发育一套分布广泛的富含海绿石的硅质碎屑岩, 针对海绿石的岩相、矿物学、地球化学及时空属性进行分析, 可以揭示海绿石的组分、成熟度、形成及成因类型, 结合地质约束有助于理解其形成的沉积地质意义。利用偏光显微镜、X 射线衍射、电子探针及 Qemscan 对海绿石矿物的岩相、矿物组成和主量元素进行系统地分析。暗绿色、呈弯曲玫瑰花状的海绿石具有高的 K₂O 含量(平均值为 8%, 质量百分比), 是形成于海相低沉积速率环境的高演化成熟型海绿石云母矿物或狭义范畴的海绿石。化学组分和时空属性揭示研究层段的海绿石经历了一定程度风暴流和/或潮汐流作用的搬运改造, 属于层内准原地海绿石。UT 段海绿石含量向上的增大趋势和成熟度的变化, 以及横向上从盆地东部斜坡区埋深 2~3 km 到西部盆缘露头区相距约 120 km 的海绿石在形态和化学成分上具有相似性, 指示其主要是层内准原地海绿石的特点。UT 段垂向上海绿石含量增大的趋势同时反映外陆棚物源区原地海绿石向岸方向的短距离迁移, 反映了相对海平面持续上升的海进过程; 而且同时期海绿石平面上的广泛分布指示沉积时期的环境属于构造稳定的陆表海。

关键词:海绿石; 矿物学; 地球化学; 沉积地质; 奥连特盆地。

中图分类号: P571; P595 **文章编号:** 1000-2383(2016)10-1696-13 **收稿日期:** 2016-01-02

Genetic Type and Sedimentary Geological Significance of Cretaceous Glauconite in Oriente Basin, Ecuador

Yang Xiaofa¹, Xie Yinfu¹, Zhang Zhiwei¹, Ma Zhongzhen¹, Guo Chun'en², Zhou Yubing¹, Wang Dandan¹, Liu Yaming¹, Zhao Yongbin¹

1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China
2. CNPC America Ltd., PetroChina, Caracas 999188, Venezuela

Abstract: Glauconitic sandstones in Napo UT Member of Cretaceous developed widely in the Oriente Basin, Ecuador. Petrographic, mineralogical, geochemical, and spatial and temporal investigations of glauconite can reveal its composition, maturity, formation and genetic types, which, together with geological constraints, can better the understanding of the significance of sedimentary geology. Using the microscopy, X-ray diffraction (XRD), electron probe microanalyzer (EPMA) and Qemscan, petrography, mineral composition and major elements were analyzed systematically. Glauconite in UT Member shows dark green and curved rosette-like nanostructure and has high K₂O content (8 wt%), indicating it evolved to highly evolved and formed at low sedimentation rate in marine environment. Chemical composition and spatial and temporal attributes of glauconite reveal its characteristics of intrasequential (parautochthonous) glaucony, and indicate as well that it has undergone transport of storm surges and/or tidal currents processes. All evidences, including upward increasement of glauconite content, maturity variation, and similarity of morphology and chemical composition between samples from the outcrop and within the basin, indicate characteristics of parautochthonous glaucony. Upward increasement of glauconite content also suggests that the parautochthonous glauconite formed in the outer shelf shifted landward, indicating the relative sea-level rise during the marine transgressive setting. Widespread distribution of contemporaneous/para-contemporaneous glauconites usually represents the epeiric

基金项目: 国家科技重大专项(No.2011ZX05028); 国家青年科学基金项目(No.41202079); 中国石油天然气股份有限公司重大科技项目(No.2013E-0501); 中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目(No.2014D-0906)。
作者简介: 阳孝法(1980—), 男, 博士, 主要从事沉积地质与石油地质方面的研究。E-mail: ouyangxiaofa@petrochina.com.cn

引用格式: 阳孝法, 谢寅符, 张志伟, 等, 2016. 奥连特盆地白垩系海绿石成因类型及沉积地质意义. 地球科学, 41(10): 1696-1708.

sea environment with stable tectonic setting.

Key words: glauconite; mineralogy; geochemistry; sedimentary geology; Oriente basin.

0 引言

广义的海绿石(glaucony)系指海相发育的绿色颗粒,不是指特定的某种矿物(Odin and Matter, 1981;Odin,1988).狭义范畴的海绿石(glaucinite)则是特指富铁和钾、含水的二八面体层状铝硅酸盐

矿物,一般化学式为: $(K,Na,1/2Ca)_x(Al,Fe^{2+},Fe^{3+},Mg,Ti)_2(Si_{4-x},Al_x)O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$,其化学成分中 x 约为 0.4~1.0,在八面体位置中 $\Sigma Fe>Al$,属于云母族(Nesse,1991;Selley *et al.*,2005;李超等,2013;陈淑慧等,2014).它是半透明至几乎不透明矿物,颜色为玻璃绿、黄绿、蓝绿等,其莫氏硬度

表 1 海绿石化过程成因模式汇总
Table 1 Interpretation models of glauconitization

参考文献	Gallihier(1935)	Takahashi(1939)	Burst(1958) Hower(1961)	Odin and Matter(1981) Odin(1988)	Казаков(1982)
海绿石化成因过程	黑云母或铁云母作为母体衍生而来	胶状二氧化硅沉淀后,经二氧化硅的水化作用和碱的后续吸收作用而形成	提出一种退化的层状格架矿物吸收钾和铁的层状晶格理论(layer lattice theory)	原始物质包括碳酸盐颗粒、泥质粪粒、有孔虫介壳充填物、各类矿物颗粒与岩屑,海绿石化作用是通过底层孔隙中的自形锥晶重新自生长并伴随底层的逐渐蚀变和交代完成的,即绿色化(verdissement)模式	在海洋沉积作用中,尤其是在成岩作用中,于有利的地化环境下,形成铁、铝、硅、钾金属有机络合物和水合络合物,大体上决定了海绿石的形成

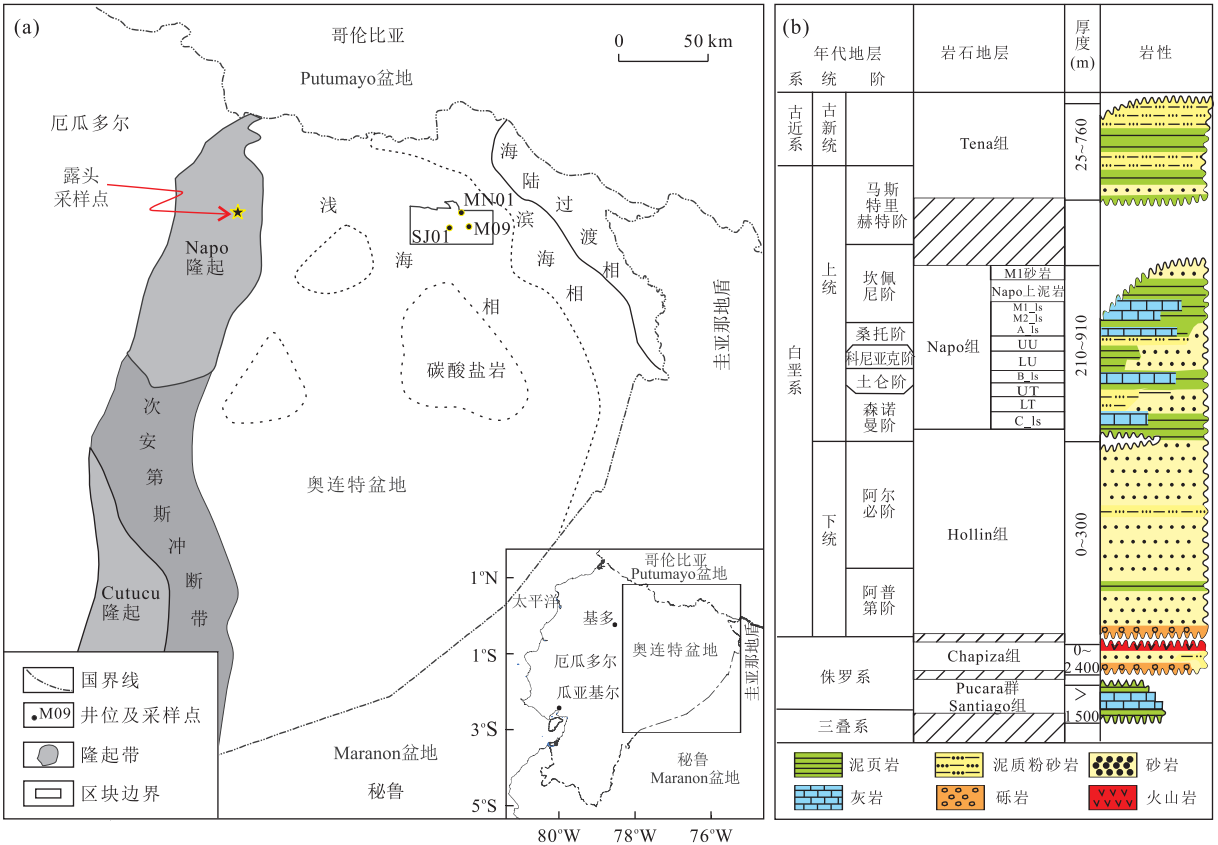


图 1 研究区地质

Fig.1 Geology of research area

a.研究区白垩纪沉积相和采样平面位置(露头及3口探井位置);b.地层综合柱状图(据谢寅符等(2012)修编)

为 2, 比重为 2.40~2.95(Anthony *et al.*, 2006; 常丽华等, 2006; Haldar and Tisljar, 2014).

海绿石主要形成于海相环境, 是海进相的特征矿物, 普遍认为它生长的有利条件是有有机质丰富的温暖浅海, 形成于水深 50~500 m 的慢速、弱还原的沉积环境, 尤其在外陆棚和上斜坡部位富集(Odin and Matter, 1981; Odin, 1988; Amorosi, 1997; Hesselbo and Huggett, 2001; Baioumy and Boulis, 2012; Banerjee *et al.*, 2012). 近来也有文献报道海绿石发育于中高能水体环境形成的沉积物内, 表明了其产出多样性的特点(Amorosi, 1997; Huggett and Gale, 1997; Mei *et al.*, 2008; 徐勇航等, 2010; Singh *et al.*, 2013). 关于海绿石化过程成因解释的几种模式详见表 1(Odin and Matter, 1981; Odin, 1988; Казаков, 1984). 常用的海绿石分类方案有两种: 一种是以 Odin and Matter(1981)和 Odin(1988)为代表的两端元分类, 建议矿物命名为海绿石蒙皂石(glaucinitic smectite)和海绿石云母(glaucinitic mica), 进而根据 K₂O 含量不同划分为 4 个演化或成熟度阶段; 另一种是 Amorosi(1995, 1997)提出的根据海绿石的物理化学特征和时空属性区分出的 2

类 3 型, 即原地海绿石和异地海绿石, 后者可以进一步划分为准原地型(或层内型)和碎屑型(或层外型). Amorosi 的分类方案适用于物源、沉积环境及层序地层的解释.

厄瓜多尔奥连特盆地白垩系 UT 段发育一套富含海绿石的硅质碎屑岩, 但是目前没有关于该套碎屑岩中海绿石矿物的岩相、矿物组分和地球化学性质方面的相关报道, 缺乏对其形成成因和地质意义的研究. 本研究选取盆地中东部井下及西部露头区的岩石样品作为研究对象(图 1a), 通过光学显微镜、扫描电镜和电子探针等分析, 揭示海绿石矿物的岩相、矿物组成和地球化学特征, 明确其成因类型及其主控因素, 并结合区域地质背景有助于理解其蕴含的沉积地质意义.

1 采样和实验方法

奥连特盆地白垩系 Napo 组(阿尔必阶—坎佩尼阶)发育的沉积背景为滨浅海环境(Dashwood and Abbotts, 1990; White *et al.*, 1995; Shanmugam

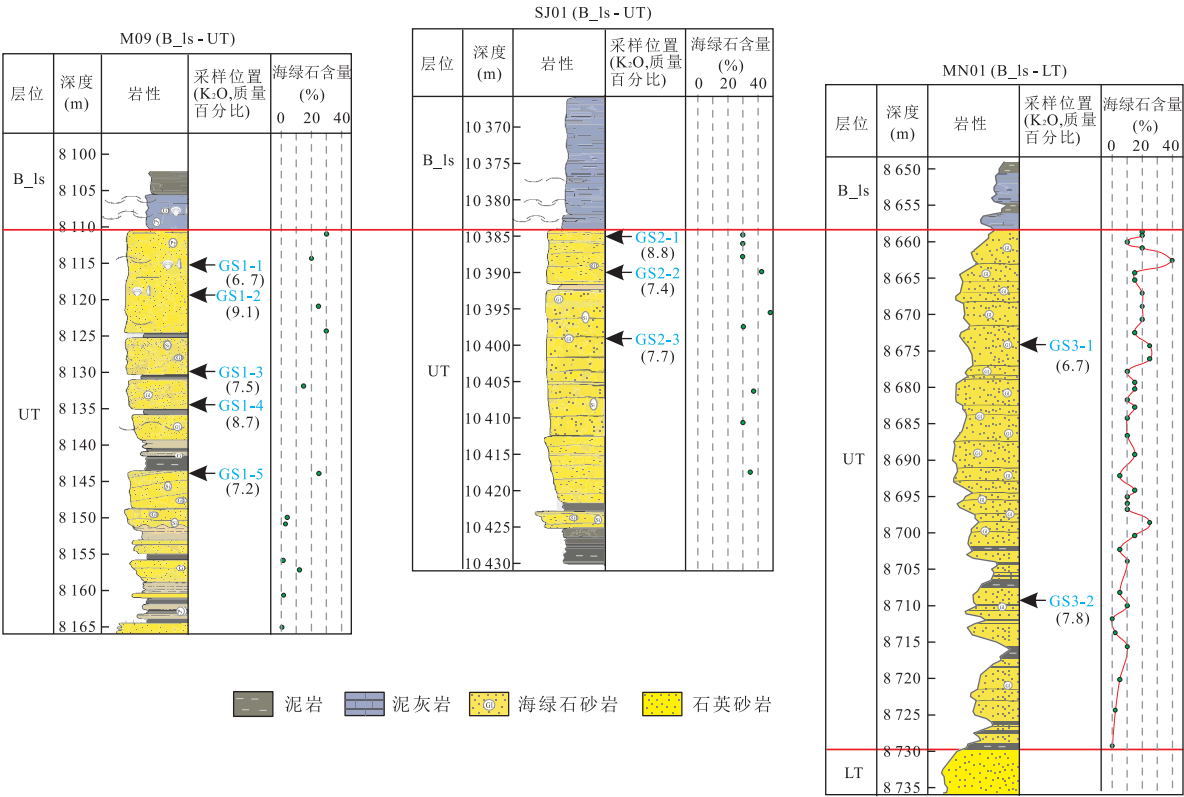


图 2 研究层段沉积序列、10 个海绿石砂岩样品在 3 口探井中的采样位置与 K₂O 含量以及海绿石含量

Fig.2 Sedimentary sequence, 10 samples location, K₂O content and glauconite content of glauconitic sandstones in three exploration wells

et al., 2000), 白垩纪原型盆地大陆边缘坳陷盆地或前陆盆地初始期(Dashwood *et al.*, 1990; 丁增勇等, 2010; Xie *et al.*, 2010; Baby *et al.*, 2013; 谢寅符等, 2014). Napo 组 UT 段含海绿石的硅质碎屑岩层段形成于海平面上升期沉积背景(Dashwood and Abbotts, 1990; White *et al.*, 1995; Shanmugam *et al.*, 2000), 是海进体系域的产物(Estupiñan *et al.*, 2010). UT 段下伏地层为 LT 段海陆过渡相石英砂岩层, 上覆地层岩性为互层状的薄层灰岩与暗色泥岩(图 1b).

岩石样品来源有两个渠道:一是取自盆地中北部 3 口探井埋深 2~3 km 处的岩心样品;二是盆地西缘露头区采集的新鲜岩石样品. 盆地 3 口探井(M09、SJ01 和 MN01 井)以及露头区岩石样品的具体位置见图 1. 盆地 3 口探井的岩心井段描述图及取样点的具体位置详见图 2, 其中 M09 井取心段(B_{ls}至 UT 段)长度为 19.51 m, 不同部位取岩样 5 块; SJ01 井取心段(B_{ls}至 UT 段)长度也是 19.51 m, 取岩样 3 块; MN01 取心段(B_{ls}至 LT 段)总长 23.62 m, 上下各取岩样 1 块. 露头区取岩样共 2 块.

薄片鉴定与岩相描述采用 Nikon ECLIPSE LV 100 POL 偏光电子显微镜. 海绿石矿物表面微区形貌、显微结构和微晶形态的观察应用 Quanta 200F 场发射环境扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM), 配合 X 射线能谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)进行元素半定量分析, 进行矿物快速鉴定. 用 Everhart-Thornley 二次电子探头(everhart-thornley diffraction, ETD), 关键技术指标中加速电压为 20 kV, 分辨率<1.2 nm, 扫描模式为高真空模式. X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)型号为 Bruker D8 ADVANCE. 此外, 应用先进的 Qemscan650 分析仪对岩石样品进行矿物含量定量分析, 扫描结果图像分辨率达到微米级.

EPMA-1600 型电子探针用于微米领域高灵敏度的元素分析, 并配合背散射电子像(back scattered electron, BSE)和光学显微镜联合分析, 采用 5 μm 电子束, 测试精度为 10^{-6} . 利用电子微束对微小的岩石样品进行原位无损化学分析, 可以得到高精确定量元素分析结果. 本次 12 块岩石样品共测试了 65 个样点.

2 实验结果

2.1 岩相特征

硅质碎屑岩主要由石英(Qz)和海绿石(Gl)组

成, 其中海绿石含量范围 1%~50%, 一般以 10%~25% 为主(图 3). 不同演化阶段的海绿石在物理属性上的表现是有差异的. 光学显微镜下, 海绿石呈现为绿色和暗绿色, 多为颗粒状、粪球粒状, 其粒度范围为 50~500 μm , 多数小于 250 μm (图 3). 海绿石颗粒的密度约为 2.95 g/cm³. 极少数海绿石经历后期成岩作用过程中挤压变形呈现假杂基结构. 海绿石颗粒整体较为均质, 但也有部分颗粒的中心颜色比边缘略暗(图 3d, 图 3e), 个别颗粒中心的暗色粪球粒呈点状集合体(图 3f), 部分可见裂纹(图 3d). 正交偏光下, 海绿石呈微晶集合体发育, 微晶呈不同色调且各自消光, 有的具有似黑云母的多色性(图 3b). 扫描电镜下观察, 海绿石矿物呈球粒状, 高倍放大呈现弯曲的玫瑰花状, 是典型的成熟海绿石的岩相特征(图 4).

2.2 矿物组成特征

Qemscan 矿物分析的测试结果图像显示(图 5); M09 井样品检测出海绿石砂岩主要矿物组分为石英、黑云母、伊利石和海绿石, 含少量的钾长石和黄铁矿, 其他矿物含量少于 1%. 结合镜下薄片鉴定分析, 认为由于海绿石在化学成分上与黑云母、伊利石相似而难以有效地区分开(25 μm 测试精度条件下), 而且部分海绿石在正交偏光下还能清楚地见到类似黑云母的多色性特征(图 3b).

研究层段又选取了 3 个岩石样品进行 X 射线衍射(XRD)测试分析, 结果表明海绿石的主要矿物组分包括伊利石和伊蒙混层(I/S), 没有检测到蒙皂石和高岭石(表 2). 伊利石与云母的重量百分比范围为 8%~21%, 相对含量为 64%~69%; 伊蒙混层(I/S)的重量百分比范围为 4%~9%, 相对含量为 29%~36%. I/S 膨胀性指标范围为 30%~40%, 对应的膨胀层含量范围为 1.2%~3.6%, 均小于 5%, 说明海绿石矿物具有低膨胀层的特点.

2.3 地球化学特征

与扫描电镜配套的能谱图(EDS)显示海绿石矿物具有高 Si、Fe 和 K 的特征. 海绿石矿物的化学组分 EPMA(electron probe microanalyzer)分析结果详见表 3, 主要包括 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、K₂O 和 MgO. SiO₂ 含量范围为 41.5%~52.0%, 平均值为 46.0%; Al₂O₃ 含量范围为 12.2%~21.7%, 平均值为 17.0%; Fe₂O₃ 含量范围为 19.8%~28.0%, 平均值为 25.0%; K₂O 含量范围为 6.1%~10.2%, 平均值为 8.0%; MgO 含量范围为 2.8%~4.8%, 平均值为 3.7%. 海绿石的主量元素成分的变化体现在原子

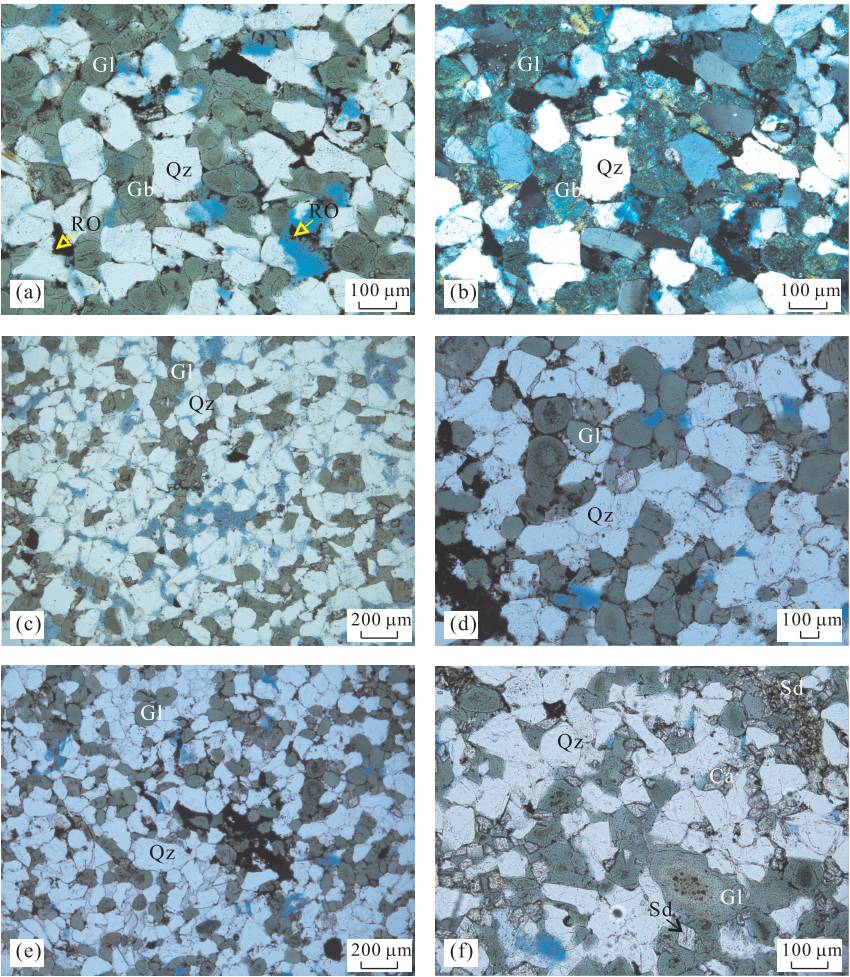


图 3 海绿石砂岩石矿物学特征

Fig.3 Petrological and mineralogical features of glauconitic sandstones

Gl.海绿石; Qz.石英; Sd.菱铁矿; Gb.页理化海绿石; Ca.钙质胶结; Ro.残余油; a 和 c~f 为单偏光显微照片; b 是对应于 a 的正交偏光照片

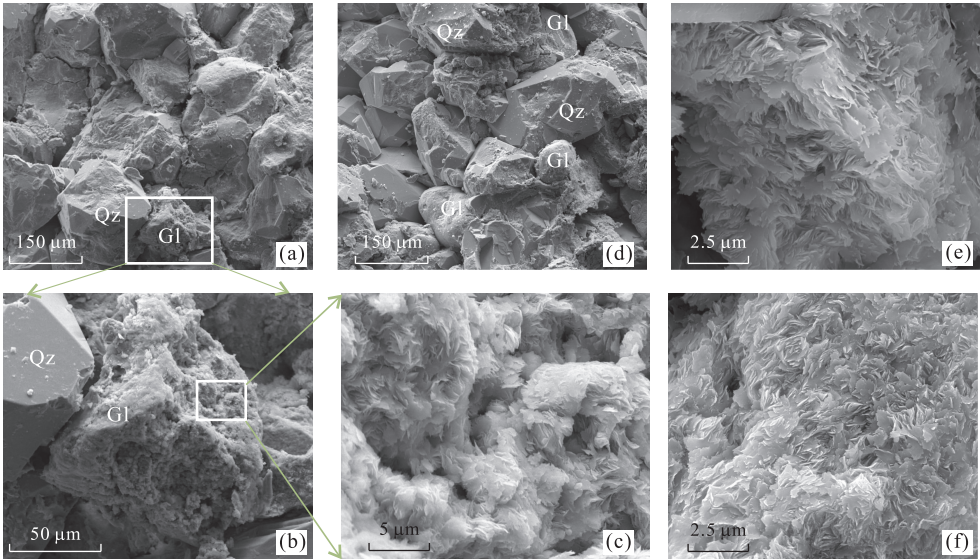


图 4 扫描电镜(SEM)下海绿石矿物的微观形貌特征

Fig.4 Morphological characteristics of glauconite minerals under scanning electron microscopy (SEM)

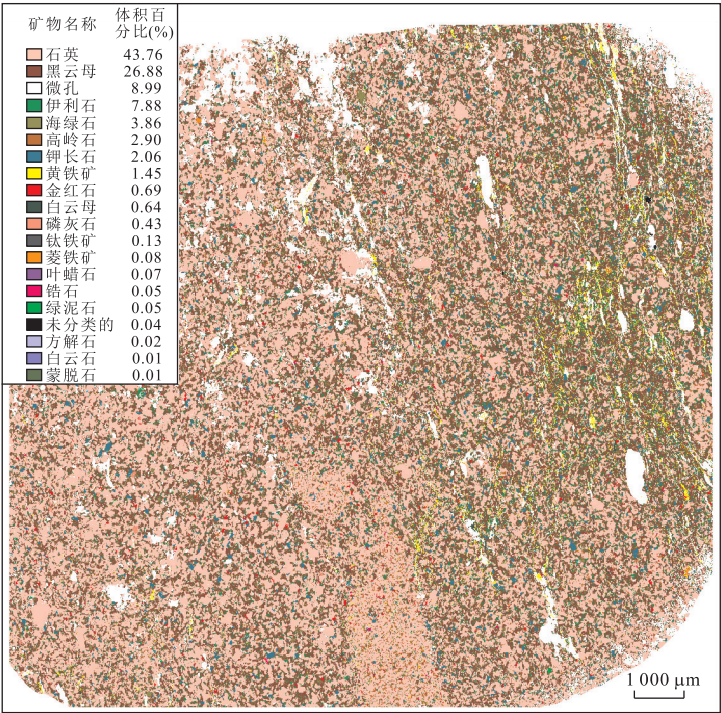


图 5 Qemscan 矿物分析测试结果

Fig.5 Mineralogical characteristics of glauconitic sandstone using Qemscan 650 instrument

表 2 海绿石颗粒 X 射线衍射 (XRD) 矿物测成分试结果

Table 2 Results of clay mineral components of glauconite using X-ray diffraction (XRD)

样品 编号	粘土含量					相对粘土含量					
	蒙皂石	伊蒙混层 (I/S)	伊利石与云母	高岭石	绿泥石	I/S 膨胀性	蒙皂石	伊蒙混层 (I/S)	伊利石与云母	高岭石	绿泥石
1-4	0	9	21	0	1	40	0	29	69	0	2
2-1	0	4	8	0	0	30	0	34	66	0	0
2-12	0	6	10	0	0	35	0	36	64	0	0

表 3 海绿石颗粒电子探针 (EPMA) 元素定量分析结果 (质量百分比)

Table 3 Analytical results of glauconite using electron probe micro-analyzer (EPMA)

样品编号	M09					SJ01			MN01		露头区	
	GS1-1	GS1-2	GS1-3	GS1-4	GS1-5	GS2-1	GS2-2	GS2-3	GS3-1	GS3-2	OT-1	OT-2
SiO ₂	48.96	46.01	47.46	45.88	45.83	46.26	46.40	45.79	47.16	46.04	43.01	45.84
TiO ₂	0.26	0.30	0.22	0.25	0.26	0.25	0.23	0.25	0.28	0.26	0.21	0.22
Al ₂ O ₃	16.87	16.07	15.45	15.78	18.10	16.68	17.25	16.38	17.68	19.82	16.10	15.47
Fe ₂ O ₃ *	23.20	24.27	25.29	25.42	24.52	23.84	24.50	25.32	24.39	22.38	27.07	24.80
MgO	3.55	3.56	3.91	3.43	3.48	3.81	3.81	4.14	3.46	3.35	4.08	4.08
CaO	0.44	0.48	0.32	0.26	0.57	0.39	0.42	0.47	0.28	0.32	0.87	0.39
Na ₂ O		0.52		0.38								
K ₂ O	6.72	9.09	7.47	8.71	7.24	8.76	7.40	7.66	6.74	7.84	8.67	9.20
Si apfu	3.27	3.16	3.22	3.16	3.11	3.16	3.15	3.13	3.18	3.11	3.00	3.16
Ti	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
^{IV} Al	0.73	0.84	0.78	0.84	0.89	0.84	0.85	0.87	0.82	0.89	1.00	0.84
Fe *	1.17	1.26	1.29	1.32	1.25	1.23	1.25	1.30	1.24	1.14	1.42	1.29
Mg	0.35	0.36	0.40	0.35	0.35	0.39	0.39	0.42	0.35	0.34	0.42	0.42
^{VI} Al	0.61	0.46	0.46	0.43	0.56	0.50	0.53	0.45	0.58	0.68	0.32	0.41
Σ ^{VI} M	2.13	2.08	2.15	2.10	2.16	2.12	2.16	2.17	2.16	2.15	2.16	2.12
Ca	0.03	0.04	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.06	0.03
Na	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.57	0.79	0.65	0.76	0.63	0.77	0.64	0.67	0.58	0.67	0.77	0.81
Σ ^{XII} A	0.61	0.85	0.67	0.82	0.67	0.79	0.67	0.70	0.60	0.70	0.84	0.84

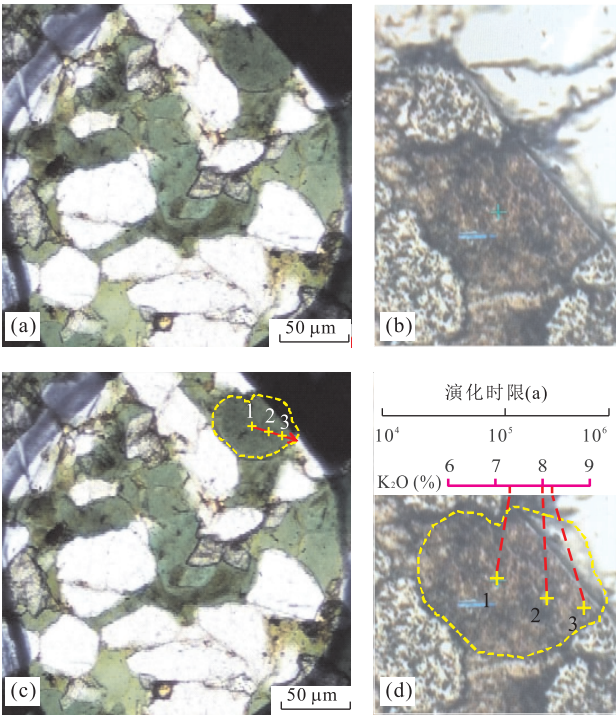
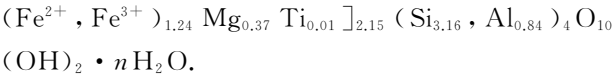


图 6 单颗海绿石不同部位电子探针(EPMA)测试位置及结果
Fig.6 Results of single glauconite with different test locations using electron probe micro-analyzer (EPMA)
a、b 分别为单偏光显微照片和背散射电子像照片原始图;c、d 指示测试点位置,后者进一步标注了不同点的 K₂O 测试结果及 Odin (1988)估计的不同成熟度海绿石对应的演化时限

结构上,研究区白垩系海绿石颗粒计算出的平均化学结构式为: $(K_{0.67}, Na_{0.01}, 1/2Ca_{0.03})_{0.71} [Al_{0.53}$



八面体位置中 Fe^{*} 大于^{VI}Al.八面体阳离子数 (Fe^{*}、Al、Mg)的平均值为 2.08~2.17,接近理论值 2.0;层间阳离子(Ca、Na、K)平均值为 0.61~0.85,这些指标均表明膨胀层含量低于 10% (Thompson and Hower,1975;李响等,2011).与 X 射线衍射分析结果一致.单颗海绿石不同部位的电子探针(EPMA)测试结果表明,K₂O 含量由内而外呈略微增大的趋势(图 6).部分颗粒的最外部 K₂O 含量大于核部,但略小于两者之间的部位.

从元素之间的相关性来看,K₂O 含量与 SiO₂ 含量整体呈现一定的负相关关系(图 7a);当 K₂O 含量小于 8% 时与 Fe₂O₃^{*} 呈一定的正相关关系,但是当大于 8% 时则呈一定的负相关关系(图 7b),而有的学者根据收集的资料,出现转折的点再 7% 附近 (Amorosi *et al.*, 2007);随 K₂O 含量的变化而 Al₂O₃ 含量基本稳定(图 7c);八面体^{VI}Al 与 Fe^{*} 呈明显的负相关关系(图 7d).

3 地质意义

3.1 成因类型划分

以 Odin and Matter(1981)和 Odin(1988)为代表的分类有两个端元,建议的矿物命名为海绿石蒙皂石和海绿石云母.根据自生海绿石的不同成因演

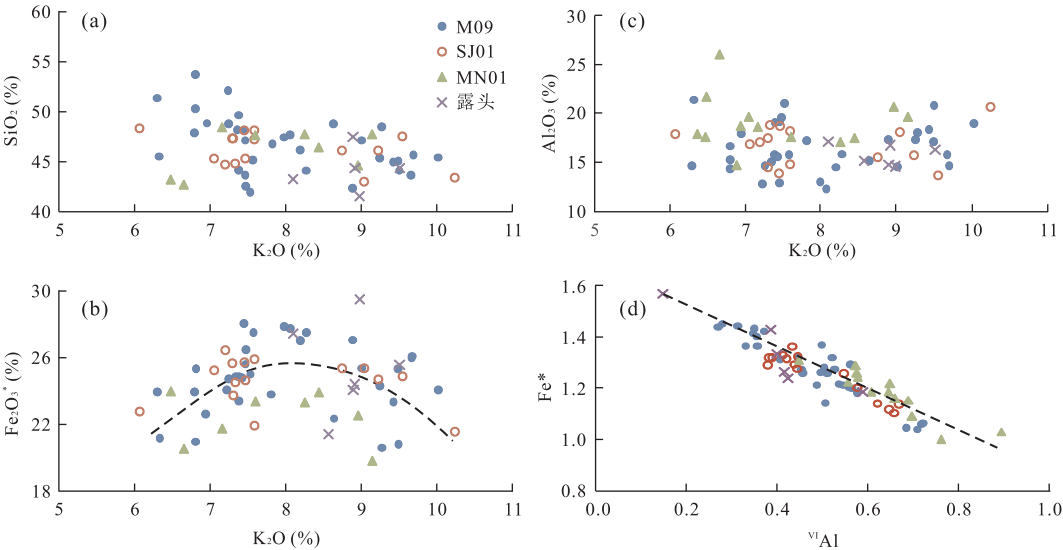


图 7 不同氧化物含量和层间阳离子关系

Fig.7 Relationship between oxide contents and interlayer cations

a.SiO₂ 与 K₂O 关系;b.全铁 Fe₂O₃^{*} 与 K₂O 关系;c.Al₂O₃ 与 K₂O 关系;d.全铁 Fe^{*} 与^{VI}Al 关系

化阶段(依据 K_2O 的质量百分比含量),从海绿石蒙皂石端元至海绿石云母端元划分出 4 类海绿石,即初生型($K_2O < 4\%$)、低演化型($4\% < K_2O < 6\%$)、演化型($6\% < K_2O < 8\%$)以及高演化型($K_2O > 8\%$).根据层间阳离子与总铁氧化物关系图(图 8)可以看出,样品全部投在海绿石矿物云母型区域,是典型的富铁和钾的海绿石云母端元,反映了它们形成环境的一致性(Odin and Matter,1981).图中长箭头表示两个矿物族范围内从蒙皂石型到云母型粘土矿物的演化,可以看出海绿石矿物的含铁量并不随着层间阳离子数量的增加而增加.上述信息均表明研究层段的海绿石矿物属于狭义范畴的海绿石.单颗海绿石 K_2O 含量由内而外呈略微增大的趋势,表明颗粒的外部经历了比其内部更长的演化时限和更充分的离子交换作用,反映了海绿石化的过程(图 6).

Meunier and Velde(1989)和 Meunier and Albani(2007)提出了评价海绿石纯度和组成成熟度的图版,即 $4M^+/Si$ 与 $Fe^*/$ 八面体阳离子总和的关系图,可以降低其他粘土矿物污染或风化作用的影响.研究区样品全部落在图版的海绿石矿物区域,可以明确地与其他绿色矿物区分开(图 9).所有的样品位于海绿石区域的右侧,指示这类海绿石化过程受控于化学扩散作用,形成于低沉积速率环境(Meunier and Albani,2007).海绿石颗粒的 X 射线衍射分析结果显示(表 2),矿物中并没有高岭石、针铁矿和纤铁矿的出现,而且 Fe 的含量小于 27%,也说明没有经历风化作用改造(Odin and Matter,1981; Huggett and Gale,1997).

3.2 成熟度

海绿石矿物的 K_2O 含量范围为 6.1% ~ 10.2%,平均值为 8.0%.按照 Odin and Matter (1981)和 Odin(1988)的划分方案,UT 段硅质碎屑岩中的海绿石属于演化—高度演化阶段的产物,是成熟—过成熟型海绿石.层间正电荷大于 0.60 且小于 0.85,代表层间阳离子亏损型二八面体云母类(interlayer-deficient mica)矿物,其 $^{VI}R^{2+}/(^{VI}R^{2+} + ^{VI}R^{3+})$ 范围为 0.19 ~ 0.24,均大于 0.15;而 $^{VI}Al/(^{VI}Al + ^{VI}Fe^{3+})$ 范围为 0.18 ~ 0.37,均小于 0.50.具有这种特点的层间亏损云母类矿物推荐命名为海绿石(Rieder *et al.*, 1998).其他属性,如暗绿色的颜色、弯曲玫瑰花状微结构外貌形态,以及层间阳离子与总铁氧化物的关系图、 $4M^+/Si$ 与 $Fe^*/$ 八面体阳离子总和的关系图等均可指示其成熟—高成熟的特点(Meunier and Albani, 2007; Sánchez-Navas

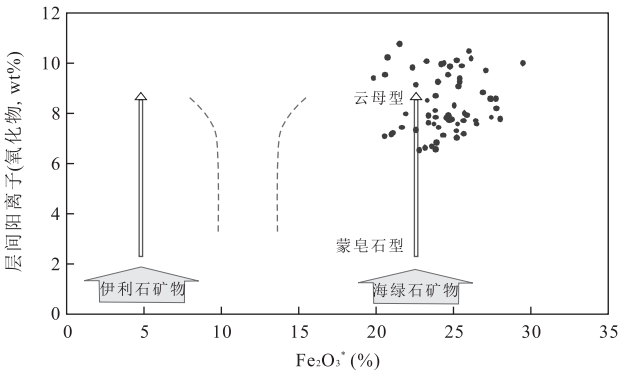


图 8 层间阳离子含量与全铁 $Fe_2O_3^*$ 含量的关系
Fig.8 Relationship between interlayer cation and total $Fe_2O_3^*$ 长箭头表示两个矿物族范围内从蒙皂石型到云母型粘土矿物的演化.海绿石的含铁量并不随层间阳离子数量的增加而增加

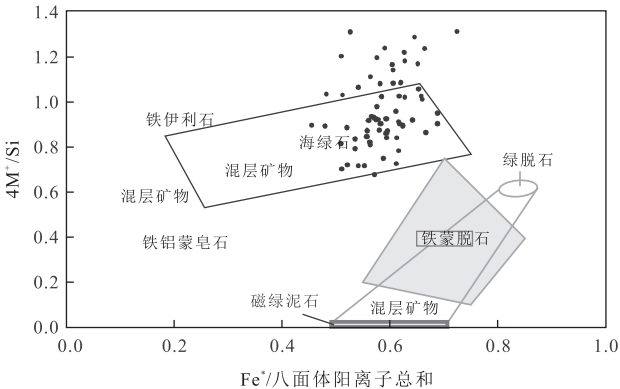


图 9 $4M^+/Si$ 与 $Fe^*/$ 八面体阳离子总和的关系
Fig.9 Relationship between $4M^+/Si$ and $Fe^*/$ sum of octahedral cations
其中 M^+ 表示层间阳离子之和, Fe^* 表示全铁 Fe^{3+}

et al.,2008).

3.3 形成成因探讨

海绿石的时空属性分析是含海绿石硅质碎屑岩成因解释的可靠依据之一(Amorosi,1995,1997).研究层段的白垩系 UT 段海绿石砂岩分布范围广,从东部斜坡区埋深 2 ~ 3 km 到西部逆冲隆起带上的露头区皆有发现,相距约 120 km 的海绿石在化学成分上非常相似,这是原地海绿石和准原地层类型海绿石的特点之一(Amorosi,1995,1997).下伏地层中仅 Hollin 组最上部的薄层砂岩中有少量海绿石发现,大量研究表明 UT 段沉积时期尚未经历后期的剧烈构造作用改造而发生隆升暴露(Dashwood and Abbotts, 1990; White *et al.*, 1995; Jaillard, 1996; Shanmugam *et al.*, 2000; Higley, 2001; Estupiñan *et al.*, 2010; Baby *et al.*, 2013),不能为盆地及露头区的 UT 段提供丰富的海绿石物源;东

部露头物源区为古老的圭亚那地盾以及盆地内 UH 段之下的地层中都没有含海绿石地层的发现或报道;UT 段下伏的 LT 段石英砂岩中亦未发现海绿石矿物.这些信息均可以反映海绿石不是层外碎屑成因的,即不是从陆上隆起物源区搬运而来的.

未成熟海绿石是一种柔软的粘土矿物,即使经过短距离搬运也会发生塑性变形(Huggett and Gale, 1997;李响等,2011).UT 段下部的海绿石含量低(小于 10%),呈颗粒相主要在砂岩纹层和波纹的槽部富集,但是未发现明显的塑形变形(图 3),说明是已经演化成熟的海绿石经历了水力分选和搬运(Huggett and Gale,1997).其中 MN01 井位于靠近盆地东部,该 UT 段的下部海绿石富集层段和不含海绿石层段交替出现(图 10a);UT 上部的海绿石含量高(10%~50%),呈颗粒相较均一分布,粒径一般 50~250 μm,分选较差,生物搅动构造发育(图 10b).

从造岩矿物的空间结构角度看,海绿石不是充填于石英颗粒孔隙间,而是与石英颗粒的粒径相仿,与石英一起呈颗粒状构成颗粒支撑结构,甚至可见多颗海绿石颗粒局部富集.换言之,通过石英颗粒孔隙中的自形雏晶重新生长并逐渐蚀变与交代而成的自生海绿石形成模式不适用于解释目的层段下部海绿石颗粒的空间分布.

原地海绿石未经过流水、波浪、潮汐和风暴改造,保留了形成时期的物理化学、沉积和古海洋等信息,对其研究可以揭示海绿石形成的古环境特征,而近距离搬运过的准原地海绿石与原地海绿石的形成成因和元素组分相似,但是一般成熟度较原地海绿石偏低(Amorosi,1995,1997;陈淑慧等,2014).UT

段海绿石的 Al₂O₃ 含量范围 12.2%~21.7%,平均值为 16.9%,其值明显偏高(Odin and Matter, 1981;Berg-Madsen,1983;Lee and Paik,1997).对于 Al₂O₃ 含量大于 20%的高铝海绿石则可能是成岩演化阶段造成的(Odin and Matter,1981),但是研究层段的高铝海绿石整体不符合这种成因.Al₂O₃ 含量大于 8%~11%的海绿石一般认为是经历了搬运改造(Odin and Matter,1981),当沉积环境处于浅海氧化条件时,K 离子活动性的降低也可以导致海绿石富铝(Berg-Madsen,1983).

综上所述,研究层段的海绿石按其化学组分和时空属性分类,主要归属于成熟—高成熟的层内准原地型海绿石,经历了一定程度风暴和/或潮汐流作用的搬运改造.

3.4 沉积地质意义

原地海绿石通常集中在相对薄的沉积物中,厚度一般小于 1~3 m,而更厚的含海绿石层段一般主要以异地海绿石为主(Amorosi,1997).通过 3 口探井以及露头区相同层段海绿石矿物的对比,发现它们具有相似的岩相、地球化学等特征,结合沉积相的研究成果可以建立研究层段的海绿石形成与沉积过程示意图(图 11).图 11 显示发育于外陆棚的成熟海绿石通常呈球状相而易于流水搬运,经历风暴流和/或潮汐流作用往陆地方向经过短距离搬运,在内陆棚与过渡带同石英颗粒混合形成含海绿石的硅质碎屑沉积物,即滨外砂波与砂席沉积,是准同生期的再活化作用.海绿石砂岩孔隙空间基本没有其他粘土矿物,胶结物为方解石、铁方解石及铁白云石,以及少量的自生矿物,如菱铁矿和黄铁矿.一般是经历了一定程度的水动力作用(如周期性的潮汐流作用)分

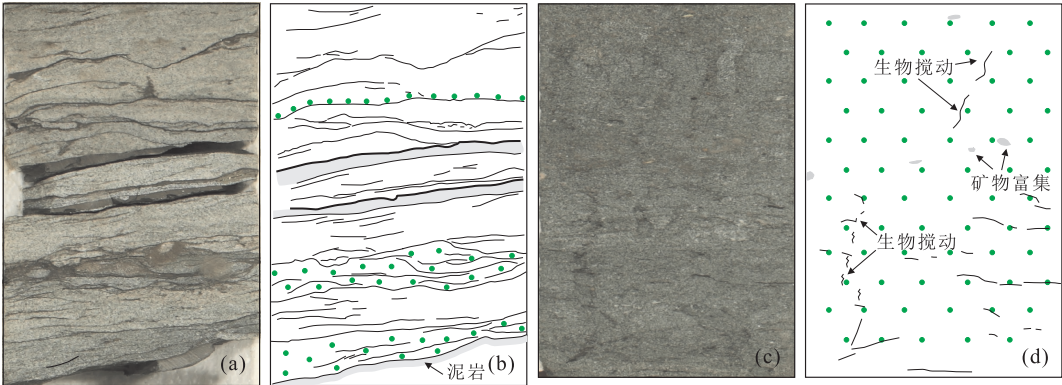


图 10 海绿石矿物的垂向分布特征

Fig.10 Vertical distribution of glauconite in glauconitic sandstones

a、c 分别为 MN01 井 UT 段下部含少量海绿石砂岩段岩心照片及其素描图;b、d 分别为 MN01 井 UT 段上部含丰富海绿石砂岩段岩心照片及其素描图

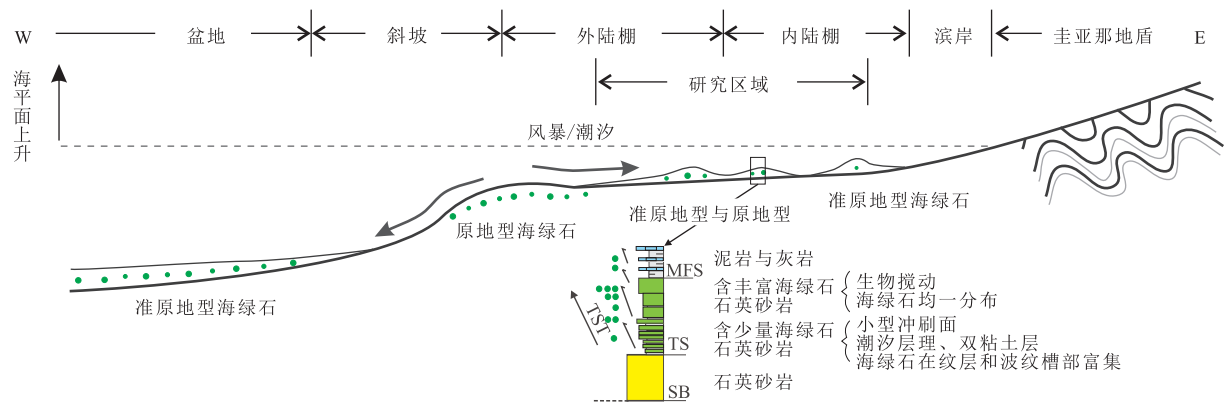


图 11 含海绿石砂岩发育与分布示意

Fig.11 Schematic of formation and distribution of glauconitic sandstone
TST.海进体系域;SB.层序边界;TS.海进面;MFS.最大海泛面

选的结果.

研究区基于岩心详细的沉积微相分析资料表明,UT 段沉积物中下部记录了风暴作用和具有潮汐层理和双粘土层的潮汐作用信息,可以支持上述解释.此外,UT 段上覆的较深水环境沉积的泥岩与泥灰岩(B_ls 段)中也发现海绿石的存在,说明该时期外陆棚环境具备海绿石生长发育的必要物理化学条件.

UT 段垂向上海绿石整体表现为向上含量增大的趋势,成熟度也出现一定程度的变化(图 2).向上至 B_ls 段逐渐过渡为外陆棚沉积,不排除 UT 段上部原地海绿石占有一定的比例,但是由于层内近源的海绿石与原地海绿石具有一致的生长环境,因此难以有效区分开来.横向上从东部斜坡区埋深 2~3 km 到西部露头区相距约 120 km 的海绿石在形态和化学成分上具有相似性或一致性,说明主要是层内准原地海绿石.垂向上海绿石矿物 K_2O 含量的变化主要是海平面振荡性上升过程中造成海绿石生成位置迁移引起的.

奥连特盆地在白垩纪阿尔必期—森诺曼期属于稳定的大陆边缘背景,整体呈东高西低的地貌格局,沉积物源主要来自东部的隆起剥蚀区(Smith, 1989; Dashwood and Abbotts, 1990; White *et al.*, 1995; Jaillard, 1996; Shanmugam *et al.*, 2000; Higley, 2001; Estupiñan *et al.*, 2010; Baby *et al.*, 2013),跨盆地南北向的连井地层对比剖面显示研究层段呈现西部厚东部薄的楔形(Estupiñan *et al.*, 2010),地层厚度分布也反映其为海进期的产物.研究区 3 口井含海绿石层段的硅质碎屑岩厚度 6~12 m,略厚于上部的灰岩与泥岩互层的 B_ls 段,垂

向上海绿石含量整体有增大的趋势,反映物源区向岸方向迁移,物源主要是位于外陆棚原地海绿石,同时也揭示了相对海平面上升的沉积演化过程,是海进期的特征矿物(图 11).奥连特盆地不同油区的沉积学证据均支持上述观点(Dashwood and Abbotts, 1990; White *et al.*, 1995; Shanmugam *et al.*, 2000; Estupiñan *et al.*, 2010).综合上述因素,研究层段的海绿石具有指示海进体系域与凝缩段的意义(Amorosi, 1995).结合区域地质背景资料(Feininger, 1975; Macellari, 1988; Smith, 1989; Dashwood and Abbotts, 1990; Jaillard *et al.*, 1995; Jaillard, 1996; Higley, 2001; Estupiñan *et al.*, 2010; Baby *et al.*, 2013),同时期海绿石的广泛分布也指示沉积时期奥连特盆地的陆棚区地势非常平缓,属于构造稳定的陆表海沉积环境.

4 结论

(1)矿物学特征和元素组分说明奥连特盆地白垩系 UT 段含海绿石硅质碎屑岩中的海绿石是形成于海相低沉积速率环境的成熟—高成熟型海绿石云母,属于狭义范畴的海绿石矿物.

(2)化学组分揭示研究层段的海绿石经历了一定程度风暴流和/或潮汐流作用的搬运改造,属于层内准原地海绿石.

(3)从时空属性角度看,UT 段海绿石含量整体向上有增大的趋势,成熟度也有一定程度的变化.横向上从盆地东部斜坡区埋深 2~3 km 到西部盆缘露头区相距约 120 km 的海绿石在形态和化学成分上具有相似性或一致性.垂向上海绿石矿物 K_2O 含

量的变化一般是横向上不同位置发育的海绿石经过风暴流和/或潮汐流作用再分配形成的,主要是层内准原地海绿石。

(4)UT 段垂向上海绿石含量整体增大的趋势同时也反映外陆棚物源区原地海绿石向岸方向的短距离迁移,反映相对海平面持续上升的沉积演化过程,是海进期的产物。平面上,同时期海绿石的广泛分布指示沉积时期的陆棚区地势非常平缓,属于构造活动稳定的陆表海沉积环境。

致谢:中国石油大学(北京)的张琴副教授、刘畅、梅啸寒、乔李井宇在电子探针等实验方面提供了大力支持和帮助,两位审稿专家提出了诸多宝贵建议,在此一并表示衷心的感谢!

References

- Amorosi, A., 1995. Glaucony and Sequence Stratigraphy: A Conceptual Framework of Distribution in Siliciclastic Sequences. *Journal of Sedimentary Research*, B65(4): 419—425. doi: 10.1306/D4268275—2B26—11D7—8648000102C1865D
- Amorosi, A., 1997. Detecting Compositional, Spatial, and Temporal Attributes of Glaucony: A Tool for Provenance Research. *Sedimentary Geology*, 109(1): 135—153. doi: 10.1016/S0037—0738(96)00042—5
- Amorosi, A., Sammartino, I., Tateo, F., 2007. Evolution Patterns of Glaucony Maturity: A Mineralogical and Geochemical Approach. *Deep Sea Research Part II*, 54(11): 1364—1374. doi: 10.1016/j.dsr2.2007.04.006
- Anthony, J. W., Bideaux, R. A., Bladh, K. W., et al., 2006. Handbook of Mineralogy. Mineralogical Society of America: 1—4129.
- Baby, P., Rivadeneira, M., Barragan, R., et al., 2013. Thick-skinned Tectonics in the Oriente Foreland Basin of Ecuador. In: Nemcok, M., Mora, A., Cosgrove, J. W., eds., Thick-Skin-Dominated Orogens: From Initial inversion to Full Accretion. *Geological Society, Special Publications, London*, 377: 59—76. doi: 10.1144/SP377.1
- Baioumy, H., Boulis, S., 2012. Glauconites From the Bahariya Oasis: An Evidence for Cenomanian Marine Transgression in Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 70: 1—7. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2012.05.001
- Banerjee, S., Chattoraj, S. L., Saraswati, P., et al., 2012. Substrate Control on Formation and Maturation of Glauconites in the Middle Eocene Harudi Formation, Western Kutch, India. *Marine and Petroleum Geology*, 30(1): 144—160. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2011.10.008
- Berg-Madsen, V., 1983. High-Alumina Glaucony From the Middle Cambrian of Oeland and Bornholm, Southern Baltoscandia. *Journal of Sedimentary Research*, 53(3): 875—893. doi: 10.1306/212F82DD—2B24—11D7—8648000102C1865D
- Chang, L., Chen, M., Jin, W., et al., 2006. Identification Manual of Transparent minerals. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Chen, S., Li, Y., Hu, Z. et al., 2014. Genesis, Diagnostic Role and Age Significant of Glauconites. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(5): 971—979 (in Chinese with English abstract).
- Dashwood, M. F., Abbotts I. L., 1990. Aspects of the Petroleum Geology of the Oriente Basin, Ecuador. In: Tankard, A. J., Suarez Soruco, R., Welsink, H. J., eds., Classic Petroleum Provinces. *Geological Society, Special Publications, London*, 50: 89—117. doi: 10.1144/GSL.SP.1990.050.01.06
- Ding, Z., Chen, W., Xiong, L., et al., 2010. Tectonic Evolution in Oriente Basin of Ecuador. *Xinjiang Petroleum Geology*, 31(2): 211—215 (in Chinese with English abstract).
- Estupiñan, J., Marfil, R., Scherer, M., et al., 2010. Reservoir Sandstones of the Cretaceous Napo Formation U and T Members in the Oriente Basin, Ecuador: Links Between Diagenesis and Sequence Stratigraphy. *Journal of Petroleum Geology*, 33(3): 221—245. doi: 10.1111/j.1747—5457.2010.00475.x
- Feininger, T., 1975. Origin of Petroleum in the Oriente of Ecuador. *AAPG Bulletin*, 59(7): 1166—1175.
- Haldar, S. K., Tisljar, J., 2014. Introduction to Mineralogy and Petrology. Elsevier Inc., New York, 1—338.
- Hesselbo, S., Huggett, J., 2001. Glaucony in Ocean-Margin Sequence Stratigraphy (Oligocene-Pliocene, Offshore New Jersey, USA; ODP Leg 174A). *Journal of Sedimentary Research*, 71(4): 598—606. doi: 10.1306/112800710599
- Higley, D. K., 2001. The Putumayo-Oriente-Maranon Province of Colombia, Ecuador and Peru-Petroleum Systems. U.S. Geological Survey, Denver, 1—31.
- Huggett, J. M., Gale, A. S., 1997. Petrology and Palaeoenvironmental Significance of Glaucony in the Eocene Succession at Whitecliff Bay, Hampshire Basin, UK. *Journal of the Geological Society, London*, 154(5): 897—912. doi: 10.1144/gsjgs.154.5.0897
- Jaillard, E., 1996. Sedimentary Model for the Oriente Basin of Ecuador during the Cretaceous. Third ISAG, France, 395—398.
- Jaillard, E., Carlier G., Sempere T., et al., 1995. The role of Tethys in the evolution of the northern Andes between

- late Permian and late Eocene times. In: Naim, A. ed., *The Ocean Basins and Margins, Volume 8: The Tethys Ocean*. New York: Plenum Press, 463—492.
- Казаков, Г. А., Wang, Y., 1984. Глаукониты, как, Геохимические, Показатели, Фациальных, условий седиментогенеза. *Geology-Geochemistry*, 12(4): 19—24.
- Lee, Y. I., Paik, I. S., 1997. High Alumina Glaucony From the Early Ordovician Mungok Formation, Korea. *Geosciences Journal*, 1(2): 108—114. doi: 10.1007/BF02910482
- Li, C., Su, J. S., Xu, F., et al., 2011. The Analytical Development of Low-Temperature Particulate Fe Speciation. *Earth Science*, 38(3): 454—460 (in Chinese with English abstract).
- Li, X., Cai, Y., Hu, X., et al., 2011. The Mineralogical Characteristics of Cretaceous Albian Glauconite in Zanda, Southwestern Xizang (Tibet) of China and Its Geological Implications. *Geological Review*, 57(1): 63—72 (in Chinese with English abstract).
- Macellari, C., 1988. Cretaceous Paleogeography and Depositional Cycles of Western South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 1(4): 373—418. doi: 10.1016/0895-9811(88)90024-7
- Mei, M., Yang, F., Gao, J., et al., 2008. Glauconites Formed in the High-Energy Shallow-Marine Environment of the Late Mesoproterozoic; Case Study From Tieling Formation at Jixian Section in Tianjin, North China. *Earth Science Frontiers*, 15(4): 146—158. doi: 10.1016/S1872-5791(08)60048-2
- Meunier, A., Albani, A. E., 2007. The Glauconite-Fe-illite-Fe-Smectite Problem: A Critical Review. *Terra Nova*, 19(2): 95—104. doi: 10.1111/j.1365-3121.2006.00719.x
- Meunier, A., Velde, B., 1989. Solid Solutions in I/S Mixed Layer Minerals and Illite. *American Mineralogist*, 74(1): 1106—1112.
- Nesse, W. D., 1991. *Introduction of Optical Mineralogy*. Oxford University Press, Oxford.
- Odin, G. S., Matter, A., 1981. De Glauconiarum Origine. *Sedimentology*, 28(5): 611—641. doi: 10.1111/j.1365-3091.1981.tb01925.x
- Odin, G. S., 1988. *Green Marine Clays*. Elsevier, New York.
- Rieder, M., Cavazzini, G., D'yakonov, Y. S., et al., 1998. Nomenclature of the Micaceous Minerals. *Mineralogical Magazine*, 63(2): 267—279. doi: 10.1180/002646199548385
- Sánchez-Navas, A., Martín-Algarra, A., Eder, V., et al., 2008. Color, Mineralogy and Composition of Upper Jurassic West Siberian Glauconite: Useful Indicators of Paleoenvironment. *The Canadian Mineralogist*, 46(5): 1249—1268. doi: 10.3749/canmin.46.5.1249
- Selley, R. C., Cocks L. R. M., Plimer I. R., 2005. *Encyclopedia of Geology*. Elsevier Inc., Oxford.
- Shanmugam, G., Poffenberger, M., ToroÁlava, J., 2000. Tide-Dominated Estuarine Facies in the Hollin and Napo (“T” and “U”) Formations (Cretaceous), Sacha Field, Oriente Basin, Ecuador. *AAPG Bulletin*, 84(5): 652—682. doi: 10.1306/C9EBCE7D-1735-11D7-8645000102C1865D
- Singh, B. P., Mohan K., Singh C. K., 2013. Facies-Dependent Occurrence of Shrinkage Cracks in the Glauconitic Sandstone, Semri Group, Vindhyan Supergroup. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, 83(4): 389—395. doi: 10.1007/s40010-013-0088-2
- Smith, L., 1989. Regional Variations in Formation Water Salinity, Hollin and Napo Formations (Cretaceous), Oriente Basin, Ecuador. *AAPG Bulletin*, 73(6): 757—776.
- Thompson, G. R., Hower, J., 1975. The Mineralogy of Glauconite. *Clays and Clay Minerals*, 23(4): 289—300. doi: 10.1346/CCMN.1975.0230405
- White, H. J., Skopec, R. A., Ramirez, F. A., et al., 1995. Reservoir Characterization of the Hollin and Napo Formations, Western Oriente Basin Ecuador. In: Tankard, A. J., Suárez, S., Welsink, H. J., eds., *Petroleum Basins of South America*. AAPG Memoir, 62: 573—596.
- Xie, Y., Cheng, J., Su, Y., et al., 2010. Petroleum Geology and Exploration Potential of Oriente-Maranon Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 37(1): 51—56. doi: 10.1016/S1876-3804(10)60014-6
- Xie, Y., Ma, Z., Liu, Y., et al., 2012. Petroleum Geology and Exploration in Foreland Basin of South America. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Xie, Y., Ma, Z., Liu, Y., et al., 2014. South America Conventional Oil and Gas Resource Assessment and Exploration Direction. *Earth Science Frontiers*, 21(3): 101—111 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y., Zhao T., Chen, W., 2010. The Discovery and Geological Significance of Glauconites from the Palaeoproterozoic Xiong'er Group in the Southern Part of the North China Craton. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(4): 671—675 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 常丽华, 陈曼云, 金巍, 等, 2006. 透明矿物薄片鉴定手册. 北京: 地质出版社.
- 陈淑慧, 李云, 胡作维, 等, 2014. 海绿石的成因、指相作用及其年龄意义. 岩石矿物学杂志, 33(5): 971—979.

丁增勇,陈文学,熊丽萍,等,2010.厄瓜多尔奥连特盆地构造演化特征.新疆石油地质,31(2):211—215.

Казаков,Г.А.,王义(译),1984.海绿石——沉积作用相环境的地球化学标志.地质地球化学,12(4):19—24.

李超,舒劲松,许斐,等,2013.沉积物中铁的化学相态分析进展.地球科学,38(3):454—460.

李响,蔡元峰,胡修棉,等,2011.藏西南札达白垩纪 Albian 期海绿石的矿物学特征及地质意义.地质论评,57(1):63—72.

梅冥相,杨锋杰,高金汉,等,2008.中元古代晚期浅海高能沉积环境中的海绿石:以天津蓟县剖面铁岭组为例.地学前缘,15(4):146—158.

谢寅符,马中振,刘亚明,等,2012.南美洲前陆盆地油气地质与勘探.北京:石油工业出版社.

谢寅符,马中振,刘亚明,等,2014.南美洲常规油气资源评价及勘探方向.地学前缘,21(3):101—111.

徐勇航,赵太平,陈伟,2010.华北克拉通南部古元古界熊耳群中海绿石的发现及其地质意义.沉积学报,28(4):671—675.