

## 不同类型海绿石的发育特征及分类体系探讨

张琴<sup>1</sup>,梅啸寒<sup>1</sup>,谢寅符<sup>2</sup>,王权鑫<sup>3</sup>,李晨溪<sup>1</sup>,阳孝法<sup>2</sup>,杜会尧<sup>4</sup>,禄佳景<sup>4</sup>

[1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; 2. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083;  
3. 中国石油大庆油田有限责任公司第一采油厂,黑龙江,大庆 163001; 4. 中国石油大港油田第一采油厂天津 300280]

**摘要:**海绿石作为一种典型的沉积相指示矿物,其分类及成因研究一直是矿物学和岩石学界关注的焦点。基于海绿石成因理论研究现状,结合国内外大量海绿石研究实例,分析原地、准原地和异地海绿石的不同特征及其地质意义,并探讨和完善海绿石的分类体系及成因。结果表明:原地海绿石的成因假说较多,目前比较公认的颗粒绿化理论和假形置换理论可以解释颗粒状和微孔隙中海绿石的成因,但仍然无法解释砂岩中大量胶结物状海绿石的成因。不同类型海绿石在元素组成、成熟度、形态、赋存环境上存在很大差异。原地海绿石富集于凝缩段,成熟度较高,元素特征反映沉积环境。准原地海绿石以多期次成因的包壳状为特征。碎屑海绿石元素特征与沉积环境往往不符,多见颗粒状,常富集于大型层理砂岩中。鉴于目前海绿石分类体系仍比较混乱,按“成因机制”和“是否搬离生成地点”,建立了“原生”和“次生”及“原地”和“异地”海绿石的分类体系。提出“自生淀胶理论”解释胶结物状、晕边状、包壳或薄膜状海绿石的成因,并用大量实例证明了自生胶结物状海绿石的存在。海绿石在指示沉积环境、岩石定年、改造岩石储集物性等方面具有重要的研究意义。

**关键词:**原地海绿石;异地海绿石;成熟度;分类体系;自生淀胶理论;沉积环境

**中图分类号:**TE121.3

**文献标识码:**A

## Characteristics of different types of glauconite and their classification systems

Zhang Qin<sup>1</sup>, Mei Xiaohan<sup>1</sup>, Xie Yinfu<sup>2</sup>, Wang Quanxin<sup>3</sup>, Li Chenxi<sup>1</sup>, Yang Xiaofa<sup>2</sup>, Du Huiyao<sup>4</sup>, Lu Jiajing<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

3. The First Oil Production Plant of Daqing Oilfield Company Limited, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163001, China;

4. The First Oil Production Plant of Dagang Oilfield, PetroChina, Tianjin 300280, China)

**Abstract:** Origin and classification of glauconite, a typical kind of sedimentary facies indicator, have long been the hot topics of mineralogy and sedimentology. This paper investigates the characteristics of autochthonous, parautochthonous and allochthonous glauconite, and documents its classification systems and genesis based on previous researches on the genesis of glauconite and a large number of case studies of glauconite worldwide. Several hypotheses have been proposed to interpret the genesis of autochthonous glauconite. The results suggest that the grain verdissment and pseudomorphic replacement hypotheses are applicable for the interpretation of the genesis of granular and autochthonous glauconite in the microscopic pores of shale, but are inapplicable for the interpretation of the formation of glauconite cement in intergranular pores in sandstones. Different types of glauconite show significant differences in elemental composition, maturity, morphology and hosting environment. Autochthonous glauconite tends to accumulate in a thin layer of condensed section, and shows high maturity. Its element-composition features, thus, are symptomatic of depositional environment. Parautochthonous glauconite is characterized by multi-stage involucrum. Detrital glauconite generally accumulates in sandstones with large-scale bedding structure, and is commonly oval or granular. Its element-composition features cannot be used as the indicators of sedimentary environments. New classification systems are proposed to replace the current confused classification systems of glauconite. The glauconites are divided into “primary” vs. “secondary” classes and “autochthonous” vs. “allochthonous” categories, according to two main criteria (i. e., genesis and whether removing from the initial formation place). An authigenic precipitation and cementation theory is proposed to interpret the genesis of glauconite that

收稿日期:2016-06-29;修订日期:2016-11-02。

第一作者简介:张琴(1973—),女,博士,副教授,沉积学、层序地层学及储层地质学。E-mail: zhangqin@cup.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41302081);教育部留学回国启动基金项目(ZX20140267)。

shows shapes of cement, halo edge and involucrum. Moreover, the existence of the authigenic glauconite cement is proved by a large number of case studies. Glauconite, therefore, plays a significant role in diagnosis sedimentary environment, rock dating and improving reservoir physical properties.

**Key words:** autochthonous glauconite, allochthonous glauconite, maturity, classification system, authigenic precipitation and cementation theory, sedimentary environment

海绿石最初的概念 (grünerde) 是德国博物学家 Humboldt 在 1823 年提出的, 借以描述在欧洲许多地区岩层中发现的绿色颗粒矿物<sup>[1]</sup>。在随后的一个多世纪的时间内, “glauconite” 被作为这种绿色颗粒的统称出现于各种学术报告和文章中。总体上, 海绿石是一类富钾、富铁、含水的二八面体云母类矿物, 含有一定比重的伊蒙混层, 矿物学特性会随着化学组分的变化而改变。Odin 和 Matter (1981) 提出 “glaucony” 一词来概括海绿石化过程中依次形成的各种海绿石族矿物, 又具有一种成因和相的概念<sup>[2-4]</sup>。

Fischer (1990) 将海绿石按照是否搬离原来的生成地点分为原地海绿石和异地海绿石两大类<sup>[5]</sup>。后者进一步分为准原地和碎屑海绿石<sup>[5-6]</sup>。海绿石在地质学中有广泛的应用, 使得判断海绿石是原地还是异地成因显得尤为重要。只有原地海绿石才能正确反映其形成时的古环境信息<sup>[7-10]</sup>。Amorosi (1997) 利用海绿石的成熟度、同生裂痕、母岩矿物等评定得出海绿石的不同类型划分标准<sup>[8]</sup>, 在一定时间内对海绿石的研究起到了指导作用。但越来越多的研究实例发现, 应用 Amorosi 的划分标准很难将准原地海绿石从碎屑海绿石中识别出来。而且, 随着研究范围的不断扩大和研究程度的不断深入, 发现海绿石的形态复杂多样, 其内部组成和成熟度也差异较大。而目前大部分研究只是指明了是“原地”和“异地”海绿石, 对真正的成因机制研究还不够深入, 其分类划分标准及命名也不统一, 使得海绿石的综合分类及其识别标志依旧十分混乱。针对上述问题, 本文结合国内外对海绿石的研究实例, 分析总结海绿石的成因机制假说和理论, 从矿物学和沉积学两方面就原地和异地海绿石的组分、成熟度、形态、结构及其相关的沉积环境特征进行分析对比, 并进一步探讨海绿石的成因机制和综合分类, 以期完善海绿石的分类体系和识别标志, 并结合国内研究现状为海绿石的研究应用提出新的展望和意义。

## 1 海绿石形成机制研究现状

### 1.1 原地海绿石成因假说

原地海绿石指在形成过程中及形成后都没有经历过外力搬运的海绿石<sup>[2-4]</sup>。自海绿石从地层中被识别出开始, 对海绿石形成机制的探讨和争论就没有间断。

从早期火山成因假说和生物成因假说到层型点阵理论, 再到被广泛接受的颗粒绿化理论及假形置换理论的提出, 这个过程长达两个世纪之久。

#### 1.1.1 火山成因假说和生物成因假说

由于实验设备和分析技术的制约, 早期对于海绿石形成机理的研究主要集中在现代大陆架上广泛分布的海绿石上。日本学者大森昌卫等人认为海绿石的形成与海底火山活动直接相关<sup>[11]</sup>, 他认为海绿石颗粒形成于浮石的孔隙中, 但大量研究表明绝大多数的含海绿石沉积体不受海底火山的影响。

1955 年拉吉林科认为, 现代海绿石主要富集于水温较高、水深为 30 ~ 500 m 的大陆架和大陆斜坡地带, 这些地区生物繁盛, 海绿石的形成与生物活动密切相关<sup>[12]</sup>。

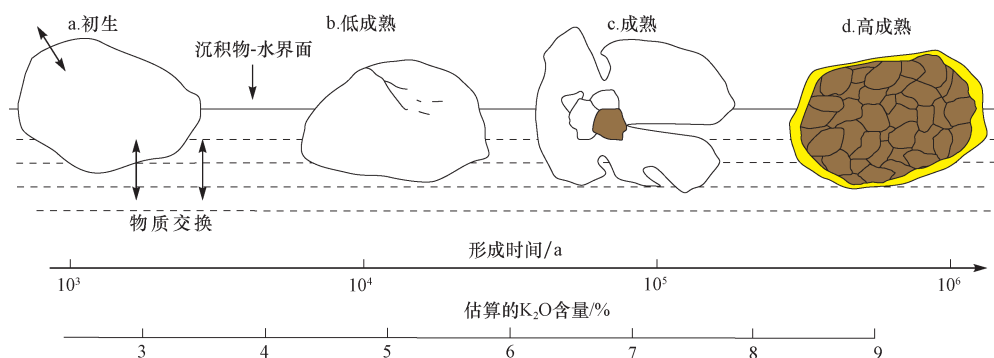
此后, 还曾出现过凝胶假说、交代假说和粪球粒假说等<sup>[12]</sup>, 然而这些假说往往都是针对某一地区或某一类海绿石, 在后来的研究中并未广泛应用。

#### 1.1.2 层型点阵理论

Burst (1958) 根据大量海绿石 X - 衍射数据和化学组分的研究, 提出了层型点阵理论<sup>[1]</sup>, 认为海绿石是以具 2 : 1 型的层状结构的矿物 (如黑云母等) 降解为条件, 在沉积物水界面上不断和外界进行物质交换而形成的海洋粘土。Hower (1961) <sup>[13]</sup> 发现海绿石化作用进行的十分缓慢, 而且需要较低的沉积速率, 并在 Burst 研究的基础上根据晶体构型将海绿石进行了分类。层形点阵理论的出现标志着海绿石形成机理向普适性的方向发展, 对后期海绿石的分类及形成环境研究产生了深远的影响。

#### 1.1.3 颗粒绿化理论

层形点阵理论把海绿石的母质矿物列为第一控制因素, 这无法解释在缺乏 2 : 1 型层状结构矿物的碳酸盐岩中的海绿石富集的问题, 而且即使微弱的环境差异也可以使相同的母质矿物向海绿石和绿泥石两种不同的矿物转化, 即环境因素对于海绿石的形成应更加重要<sup>[2]</sup>。Harder (1980) 进行了实验室合成实验, 认为海绿石主要形成于沉积作用缓慢的外陆架和大陆斜坡, 属于  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  共存的弱氧化至弱还原环境<sup>[14]</sup>。在此研究的基础上, Odin 和 Matter (1981) <sup>[2]</sup> 提出了颗

图1 粒状母质矿物的海绿石化过程示意图<sup>[2-3]</sup>Fig. 1 Schematic diagram showing the process of glauconitization of spherulite host<sup>[2-3]</sup>

粒绿化理论,认为海绿石化作用发生在沉积物与水界面附近(图1),最初由凝絮作用形成的贫钾的海绿石质蒙脱石充填在母质矿物(如灰岩、粪球粒、岩屑)的边缘孔隙内,随着母质矿物的不断溶蚀,海绿石质蒙脱石含量不断增加。随着颗粒不断与海水进行物质交换而获得钾离子,蒙脱石膨胀层发生崩塌,导致裂隙结构的产生,从而孔隙水进入颗粒核心部位,引起与外界发生物质的交换。在演化的最终阶段,海绿石质蒙脱石逐渐变为海绿石,并交代整个颗粒,进一步经过重结晶作用而形成高成熟度的海绿石。

颗粒绿化理论认为海绿石是经历了早期的溶蚀作用和晚期的成熟作用的结果<sup>[10,15]</sup>,而不是 Burst (1958) 和 Hower (1961) 解释的先生成矿物蚀变作用的产物,而时间是控制海绿石化作用的重要因素,海绿石化作用时间越长,颗粒中的钾含量就越高<sup>[2]</sup>。因此,海绿石颗粒中  $K_2O$  的含量是评价成熟度的良好指标。由此将海绿石分为初生( $K_2O$  含量小于4%)、低度成熟( $K_2O$  含量为4%~6%)、成熟( $K_2O$  含量为6%~8%)、高度成熟( $K_2O$  含量大于8%)四个阶段<sup>[2-3,6,16]</sup>。海绿石颗粒的颜色也是指示成熟度的重要标志,随着成熟度的升高,海绿石颗粒依次变深,从黄绿色、浅绿色、翠绿色变为墨绿色<sup>[2]</sup>。随着成熟度的变化,海绿石的元素组成、晶体结构以及颗粒表面形态也会发生变化。颗粒绿化理论能很好地解释颗粒状海绿石的成因。

#### 1.1.4 假形置换理论

颗粒绿化理论并不能很好地解释除颗粒状以外如胶结物状、晕边状、薄膜状海绿石的成因。2015年 Banerjee 在研究 Karai 页岩时发现,在有孔虫、苔藓、藻类体内极微小的孔隙中发育有海绿石,这些孔隙可能无法使初始的母质矿物进入,即无法被层型点阵理论和颗粒绿化理论解释<sup>[17]</sup>。因此, Banerjee 提出了“假形置换理论”,他认为这种机制包含两个过程,首先是微孔隙中贫钾、贫铁的原生海绿石的沉淀,接着是孔隙水中 K、Si、Fe 等元素的进入,使得原始贫钾、贫铁的海

绿石发生置换而形成成熟度较高的海绿石<sup>[17-18]</sup>。该理论需要大量陆源物质的溶蚀而形成的高  $K^+$  和高  $Si^{4+}$  浓度的孔隙水。而且仅仅应用于泥页岩极微小孔隙中形成的海绿石,而对于砂岩粒间孔隙中大量胶结物状、颗粒晕边状、薄膜状海绿石的成因仍然无法解释。

### 1.2 异地海绿石的形成机制

零星的早期报告中指出,部分海绿石颗粒可能起源于外部源区的古老岩石。直到 1952 年 Light 提出简单的分类标准,将海绿石大体分为原地海绿石和异地碎屑海绿石两类<sup>[5]</sup>。随后 1964 年 Lweis 提出经历短程搬运的海绿石颗粒具有与原地海绿石和异地碎屑海绿石不同的特征<sup>[8]</sup>。Fischer (1990) 综合前人的研究,进一步将异地海绿石分为准原地(或层内)和碎屑(或层外)海绿石<sup>[5]</sup>。准原地海绿石是在海绿石化过程中发生了短距离再搬运作用而离开其形成地点,但还是保存在同时代的沉积地层中,因此,未达到海绿石演化的最终阶段<sup>[6,10]</sup>。碎屑海绿石是指那些从更老的地层中受河流、风暴、重力流等外力搬运而来再沉积的海绿石颗粒,可能已经经过长距离搬运而远离原始形成地点。

## 2 不同类型海绿石的差异特征

### 2.1 不同类型海绿石的成熟度及元素组成特征

一般而言,原地海绿石的演化程度较高,具有很高的成熟度<sup>[19]</sup>;准原地海绿石由于海绿石化作用时间相对较短会有较高含量的伊蒙混层矿物,因而成熟度低-中等;而碎屑海绿石的成熟度特征受再次搬运沉积前的海绿石化程度的控制,往往受后期成岩改造而难以确定。

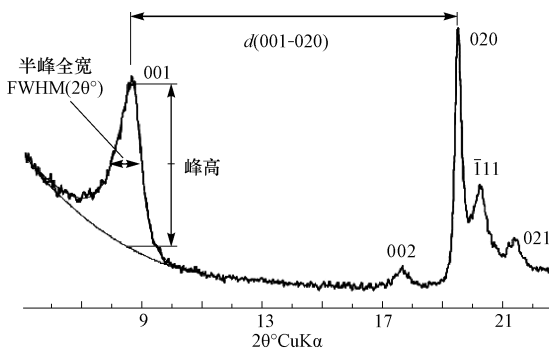
根据海绿石成熟度不同,其化学成分和晶体结构都会发生相应的改变。Odin 和 Fullagr (1988)<sup>[3]</sup> 在使用 X-衍射研究海绿石的晶体结构时发现,随着演化程度增加,海绿石 X-衍射图谱上基底反射(001)峰与

(020)峰之间的距离 $[d(001-020)]$ 缩短(图2),指示了海绿石晶体中膨胀层含量的降低<sup>[20]</sup>,反应了海绿石的内层构型的改变。Amorosi(2007)<sup>[16]</sup>在研究了西欧25个白垩纪和上新世海绿石样品后,提出(001)衍射半峰全宽(FWHM)是海绿石成熟度的另一个高效的评价指标(图2)。不同类型海绿石的化学组成变化很大,特别是K元素和八面体中的Al、Fe元素<sup>[20]</sup>。前人利用电子探针实验<sup>[7-8,16,21-23]</sup>,对比不同地区不同成熟度海绿石的样品时发现,Al元素的富集与海绿石的成熟度成负相关性,而Fe元素的丰度与海绿石的成熟度呈正相关性,这说明了随着K元素在八面体中的固定,Fe原子逐步取代Al的八面体核心位置。Mg元素的丰度与海绿石中K元素含量呈明显的负相关性,意味着Mg原子存在于海绿石母质矿物中,在海绿石的演变过程中逐渐被钾或铁取代。

海绿石的元素组成特征除了与海绿石化的演化程度有关外,与形成环境也有很大的关系<sup>[24]</sup>,一般认为海绿石中P元素的富集与海洋有机生物相关<sup>[25]</sup>;异常高的Al含量与浅海次氧化环境相关<sup>[15]</sup>;Fe元素的含量与陆源径流相关。Eder等(2007)<sup>[26]</sup>利用元素特征在俄罗斯西Siberian盆地上侏罗统中识别出高铝的褐色碎屑海绿石和高铁的原地深绿色海绿石,指出海绿石的化学组分特征可作为判别成因的重要指标。原地海绿石元素特征与沉积环境相符;相反,碎屑海绿石由于后期再改造作用,往往反映出与沉积环境不相符的特征。只有在相似的环境中形成的海绿石,其Fe、Al和Mg等元素含量才能作为界定成熟度的指标。

## 2.2 不同类型海绿石的形态特征

显微镜下海绿石在形态上展现出的多样性与海绿



| 成熟度特征              | 初生    | 低成熟         | 成熟                            |
|--------------------|-------|-------------|-------------------------------|
| K <sub>2</sub> O/% | 3.82  | 4.89 5.91   | 6.08 6.62 6.95 7.85 7.92      |
| FWHM               | 2.67  | 2.32 1.85   | 1.79 1.56 1.38 1.00 0.92      |
| d(001)             | 12.88 | 12.13 11.10 | 10.92 10.79 10.77 10.81 10.83 |

图2 海绿石X-衍射图谱及各成熟度海绿石FWHM和 $d(001)$ 数据<sup>[8]</sup>

Fig.2 X-ray diffraction trace,FWHM and  $d(001)$  data of glauconites at various maturity stages<sup>[8]</sup>

石的宿主矿物以及成岩作用有着密切的联系,对海绿石的类型划分有着重要的指示作用。国内外学者如Odin和Matter(1981)<sup>[2]</sup>、丁述理(1991)<sup>[27]</sup>、常全明(1992)<sup>[28]</sup>、吴建君(1992)<sup>[29]</sup>等都曾提出过各自的标准,但仍存在着划分标准不统一、普适性不强及命名术语混乱等问题。综合考虑海绿石与成因的联系,并根据大量的研究实例,笔者将海绿石的形态分为以下7类。

### 1) 颗粒状

颗粒状为比较常见的形态,其形态包括圆形、椭圆形、豆荚形、新月形等(图3a)。Odin颗粒状和Matter(1981)<sup>[2]</sup>认为此类海绿石的粒径、形态在很大程度上受控于母质矿物的形态,后期的改造作用只有很小的影响。而笔者通过对不同地区海绿石的形态研究发现,颗粒状海绿石并不一定全是颗粒绿化而形成,部分磨圆度较好的颗粒状海绿石也可能是早期的海绿石胶结物再次经过搬运、打碎、磨圆而形成,属于碎屑海绿石。因此,不能单纯依靠这类海绿石的出现判断其成因类型。

### 2) 晕边状

晕边状指由早期的海绿石颗粒外部包裹一圈薄的浅色外壳的海绿石颗粒(图3b—d,图4)。外部的晕边是后期孔隙水中直接沉淀、胶结而形成的海绿石。因此,此类海绿石发生了两期的海绿石化作用,但基本未脱离原来的形成环境,是准原地海绿石的重要标志。如笔者在研究厄瓜多尔Oriente盆地白垩系砂岩中的海绿石时发现,海绿石存在浅绿色晕边和褐绿色内核(图3c,图4)。根据电子探针实验数据(图4),晕边和内核处钾元素的百分含量存在着明显的差异,内核处钾元素含量较高,为6.711%,指示的成熟度高,为原地海绿石;晕边处钾元素含量较低,为5.151%,指示的成熟度较低,属于准原地海绿石。因此,海绿石晕边和内核分属于不同的成熟度阶段,指示了两个期次的海绿石化作用。

### 3) 碎屑假象状

碎屑假象状为主要交代其他矿物而成,常常为黄绿色或浅绿色,成熟度低(图3e,f)。以交代黑云母最常见<sup>[27]</sup>,其次还可以见到海绿石交代长石、白云石、方解石等矿物的现象,可保留原颗粒的部分光学性质。由于残留矿物多不稳定,此类海绿石的出现说明未经长距离的搬运作用,是原地海绿石和准原地海绿石的良好标志。

### 4) 胶结物状或胶体状

在大量的海绿石砂岩照片中,呈胶结物状和胶体状的海绿石也比较常见。如Oriente盆地白垩系石英砂岩中,除了存在颗粒状(图3a)或晕边状海绿石(图3c,图4)之外,也普遍发育胶结物状的海绿石(图3g)。再如天津蓟县剖面铁岭组柱状叠层石灰岩中,海绿石多以胶体形式弥散或密集分布在叠层石柱体的外

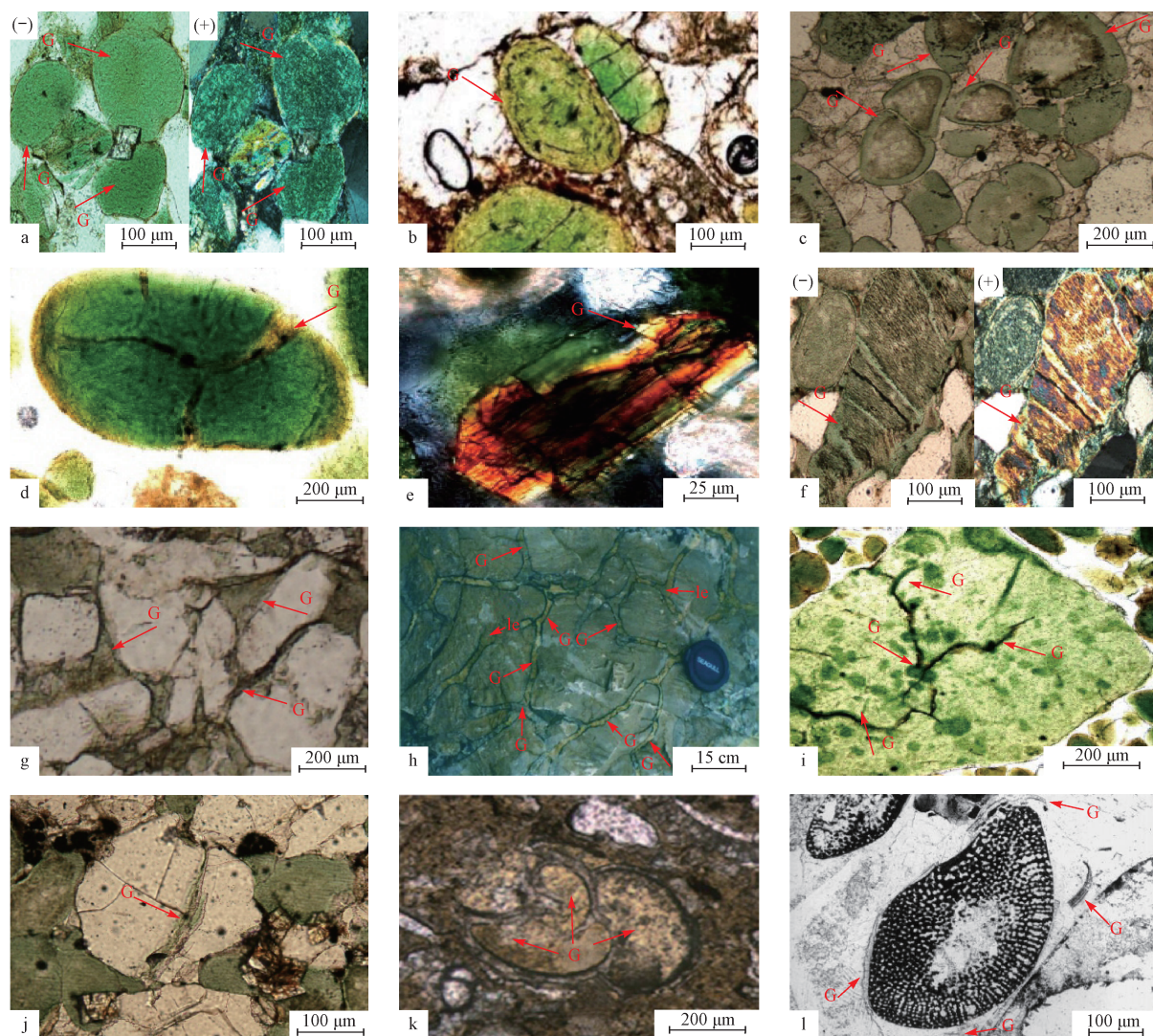


图 3 各种形态海绿石显微照片特征

Fig. 3 Microphotographs of glauconites with different shapes

a. 颗粒状海绿石; b, c, d. 晕边状海绿石; e, f. 碎屑假象状海绿石; g. 胶结物状海绿石; h. 胶体状海绿石<sup>[6]</sup>; i. 色素侵染状海绿石; j. 沿裂缝色素侵染状海绿石; k. 生物内膜状海绿石<sup>[33]</sup>; l. 包壳状海绿石<sup>[34]</sup>

G. 海绿石; le. 碳酸盐泥晶

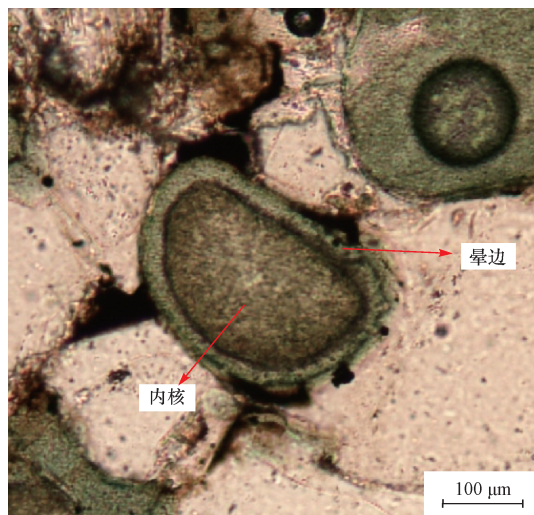


图 4 厄瓜多尔 Oriente 盆地白垩系具晕边海绿石  
Fig. 4 Characteristics of glauconite with halo edge in the Cretaceous in Oriente Basin, Ecuador

壁上(图 3h)<sup>[6]</sup>。此类海绿石的生成显然不能完全用“层形点阵理论”和“颗粒绿化理论”进行解释,笔者认为部分(图 3h)可以用假形置换理论加以解释,而对于孔隙中大面积存在的海绿石胶结物,特别是占据原始孔隙的海绿石胶结物应该是孔隙水中直接沉淀即胶结作用而形成的海绿石。Harder 于 1980 年在实验室真正合成了“原生海绿石”可以支持这一观点<sup>[14]</sup>。

#### 5) 色素侵染状

此类海绿石曾一度被认为是由细小的粘土矿物和初期的孔隙或裂缝充填物经海绿石化作用而形成(图 3i, j), 其外形受控于孔隙形态且常具侵染状边缘<sup>[27, 30]</sup>, 是成岩期所形成的原地海绿石<sup>[4, 27-28, 31]</sup>。此外, 存在一些厚层(2~3 m)粘土矿物层全部转化为海绿石的例子, 如埃及 Qusseir 组“非颗粒海绿石”<sup>[23]</sup>和比利时 Campine 盆地新近系“粘土级海绿石”<sup>[32]</sup>, 更加

使人相信此类海绿石是由粘土矿物转化而来。笔者认为用 Banerjee 提出的假形置换理论能更好的解释这种在微小孔隙内生成的海绿石<sup>[17-18]</sup>。

#### 6) 内膜状

这类海绿石的形成原因与生物的发育密切相关,当有孔虫等微体生物死亡沉落海底后,受生物体腔内有机质腐化作用影响,形成一个弱还原性微环境,有利于形成海绿石内膜(图 3k)<sup>[25]</sup>。这类海绿石在海洋中广泛分布,最大深度可达 2 100 m 以上<sup>[33]</sup>,大量发育的内膜状海绿石是原地海绿石的重要标志。

#### 7) 包壳状或薄膜状

这类海绿石指生物碎屑、石英、长石等颗粒外部包裹薄的纤维状海绿石,呈薄膜状或包壳状(图 3l),Chafetz 和 Reid 等认为此类海绿石是在搅动和簸选的中-高能环境中形成<sup>[34-35]</sup>。笔者认为此类海绿石的形成应为从孔隙水中沉淀的海绿石胶结物围绕颗粒生长而形成,属于原地海绿石。

### 2.3 不同类型海绿石颗粒微观结构和表面形态

在显微镜下,海绿石颗粒边缘常表现出“V”字形的裂痕、抛光面、氧化圈等特征。其中,“V”字形的裂痕与蒙脱石膨胀层含量的降低有关<sup>[2,5,9]</sup>。这些裂痕的出现被认为是原地海绿石可靠的证据,它们会随着长距离搬运和再作用而消失或破裂。另一方面,抛光面和铁质氧化圈层的出现是经历了长距离搬运的碎屑海绿石的重要识别标志<sup>[2]</sup>。亦可见碎屑海绿石被完全氧化而形成铁质矿物的现象,如北京昌平龙山地区青白口系长龙山组的斑块状铁质石英砂岩,其中的铁质斑块就是由海绿石氧化析出铁质而形成。

大量的海绿石扫描电镜照片表明,海绿石的微观形态不是单一的,会随着海绿石成熟度的变化而变化<sup>[9,22,26,36]</sup>。原地海绿石最初阶段为不定形的细小颗粒(小于 5  $\mu\text{m}$ )(图 5a),在低成熟阶段小颗粒相互依附形成了 2~3  $\mu\text{m}$  的毛虫状结构<sup>[2]</sup>(图 5b)。大约 1~3  $\mu\text{m}$  的片状结构(图 5c)可以在较成熟的海绿石中观察到,它们轻微的弯曲近平行排列并覆盖了母质矿物上的晶纹和微裂缝。到演化的最终阶段,片状结构结合形成直径大约 4~5  $\mu\text{m}$  的花团状形态<sup>[9,29]</sup>(图 5d)。即使短途搬运,这些脆弱的颗粒表面形态也会遭到破坏,如埃及上白垩统(图 5e)和下白垩统准原地海绿石(图 5f)的原生颗粒形态部分或完全被破坏<sup>[22]</sup>。

## 3 不同类型海绿石形成的环境制约与沉积特征

### 3.1 不同类型海绿石在沉积层序中的发育位置

依据颗粒绿化理论,海绿石化的过程非常缓慢,高

成熟的海绿石的形成大概需要 1 Ma<sup>[3,9]</sup>。而且,海绿石的形成需要低的沉积物供给速率<sup>[2-3,8]</sup>。因此,高成熟的海绿石的集中出现常被认为是“凝缩段”的重要识别标志<sup>[2,37]</sup>。陈荣坤(1994)<sup>[37]</sup>研究华北地台寒武纪沉积层序时发现,海绿石质凝缩层段是一沉积速率极低、厚度较薄的海相沉积单元,并根据凝缩层段中海绿石矿物中  $\text{K}_2\text{O}$  的百分含量和其内部晶体结构划分出了其演化级次和形成时限,从内陆棚—中陆棚—外陆棚沉积单元,凝缩段中海绿石的演化程度依次变高。Amorosi 等(2012)<sup>[19]</sup>在研究了西班牙 Guadarrama 山脉海绿石发现,典型的原地海绿石只分布于凝缩段的薄层内,而准原地海绿石颗粒广泛分布于整个海侵体系内。这些准原地海绿石是经历了一段时间的海绿石化作用后,经历了风暴、潮汐和波浪等外力作用经短程搬运后聚集在海侵体系内的潮坪<sup>[34-35]</sup>、潟湖<sup>[15]</sup>和水下浅滩<sup>[38]</sup>等环境中。

在低位体系域中,海平面低于陆架坡折对海绿石的形成非常不利。而另一方面,在这种以侵蚀为主的大背景下,古老的岩层接受侵蚀,如果其内含海绿石,会被河流<sup>[24]</sup>或重力流<sup>[39]</sup>等流体带入三角洲、外陆棚甚至是深海环境中,也可以形成异地碎屑海绿石。

高位体系域以海岸向盆地中心不断推进为特征,因此,不利于原地海绿石的生成。而在高位体系域的细粒外陆棚沉积速率极缓慢的沉积物中,偶尔也会少量原地海绿石形成<sup>[24]</sup>。Harris 和 Whiting(2000)<sup>[40]</sup>在研究西大西洋海岸时发现,在高位体系域沉积速率极缓慢的陆棚沉积序列中见到了少量成熟度变化的原地海绿石。

### 3.2 不同类型海绿石的沉积特征

原地海绿石在岩层内往往均匀分布,且发育于缺乏层理的薄层(少于 1~3 m)泥岩中或呈薄膜状、结壳状发育在不整合面、硬底面之上<sup>[6,10]</sup>。超过 3 m 以上的含海绿石沉积体往往和异地海绿石作用相关<sup>[8]</sup>,并在垂向上展现出不均匀性,富海绿石层和贫海绿石层常常交替出现。异地海绿石常集中于大型层理、波痕或槽模发育的砂岩中,显示了沉积物的大规模运动和再分配作用。

此外,与海绿石伴生的胶磷矿和鱼齿化石曾被认为是判断原地海绿石的重要标志<sup>[24]</sup>。然而,在意大利 Alpine 组和 Apennine 组<sup>[8]</sup>受风暴和潮汐控制的准原地海绿石中胶磷矿和鱼齿化石的大量聚集推翻了这一标准。目前,普遍被人接受的观点是,当海绿石伴生大量微体化石和生物遗迹时,可以判断其没有经历二次搬运,是原地成因。

综上所述,原地和异地海绿石在元素组成、成熟

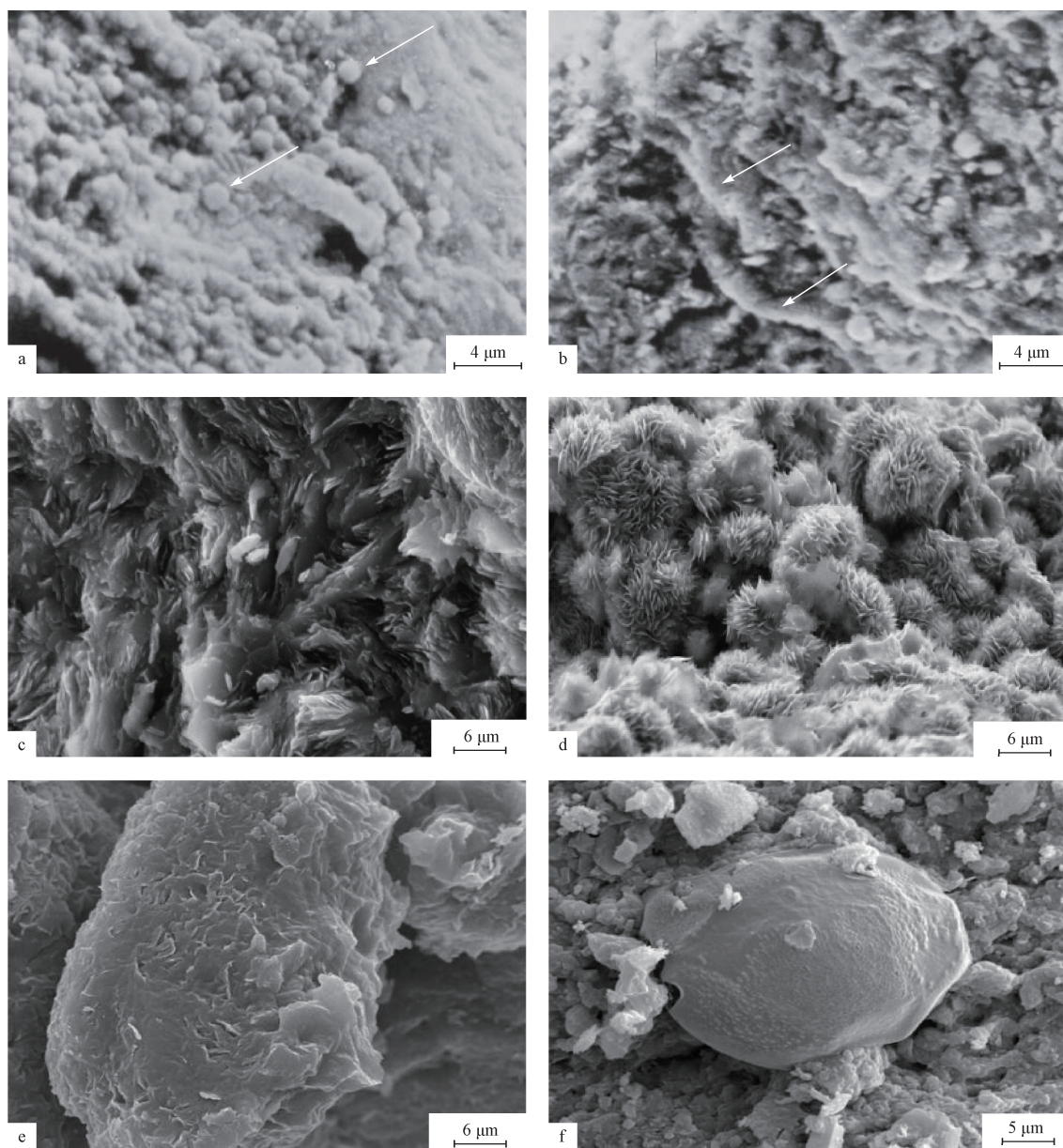


图5 不同成熟度海绿石颗粒表面形态特征<sup>[22,26,36]</sup>

Fig. 5 Morphological characteristics of grain surfaces of glauconites with various maturities<sup>[22,26,36]</sup>

a. 初生海绿石的细小无定形颗粒状结构;b. 低成熟海绿石的毛虫状结构;c. 成熟海绿石的近平行层片状结构;d. 高成熟海绿石的花团状结构;  
e. 准原地海绿石,原生表面形态部分被破坏;f. 准原地海绿石,原生表面形态完全被破坏

度、颜色、颗粒形态、微构造、表面形态、生物化石、沉积构造等方面均表现出不同的特征(表1),而海绿石的成因类型不能仅靠单一的判别标准而确定,需要结合多方面的评价标准综合判断。

## 4 讨论

### 4.1 海绿石的分类体系探讨

如前所述,前人对海绿石的分类大都是按照海绿石是否搬离原来的生成地点分为原地海绿石和异地海绿石,也有人将原地海绿石叫做“原生海绿石”<sup>[34,41]</sup>,而邱传珠(1989)将海绿石分为自生海绿石和他生海

绿石<sup>[42]</sup>,但未讨论两种海绿石的区别。因此,对于海绿石的分类、成因机制及其命名目前尚未统一。其次,颗粒绿化理论和假形置换理论不能解释胶结物状、薄膜状和晕边状海绿石的成因。从海绿石的形态特征也不能真正区分是原地成因还是异地成因,如颗粒状海绿石。此外,Harder于1980年在实验室真正合成了海绿石<sup>[14]</sup>,证明了“原生海绿石”的存在。因此,还需要从海绿石形成前的物质状态和形成过程来探讨海绿石的成因机制、分类及命名。以此为依据,并为了统一海绿石的划分,使其成因理论简单化,笔者建议首先按照“成因机制”将海绿石划分为“原生”和“次生”海绿石两大类(表2)。

原生海绿石是从孔隙水中通过沉淀或絮凝作用直

表 1 原地和异地海绿石的特征对比

Table 1 Characteristics comparison of autochthonous and allochthonous glauconites

| 地质特征   | 海绿石类型                       |                      |                   |
|--------|-----------------------------|----------------------|-------------------|
|        | 原地海绿石                       | 异地海绿石                |                   |
|        |                             | 准原地海绿石               | 碎屑海绿石             |
| 元素组分   | K 含量高,元素特征与沉积环境相关           | K 含量较高,元素特征与沉积环境存在差异 | 元素特征与沉积环境明显差异     |
| 成熟度    | 高成熟                         | 低成熟到成熟               | 低成熟到高成熟           |
| 颜色     | 深绿色到翠绿色                     | 翠绿色到黄绿色              | 常被氧化呈棕色或褐色        |
| 颗粒形态   | 颗粒状、碎屑假象状、内膜状、胶体状、色素侵染状、包壳状 | 晕边状常见,也可见其他形态        | 颗粒状比较多见,也可见其他各种形态 |
| 表面特征   | V 字裂痕                       | 被破坏的 V 字裂痕           | 抛光面、铁质圈层          |
| 微观结构   | 细小颗粒、毛虫状、层片状、花团状            | 晶形部分或全部消失            | 全部消失              |
| 层序发育位置 | CS、TST、HST 下部               | TST                  | 主要为 LST           |
| 沉积特征   | 缺乏层理构造,呈薄层状,厚度小于 3m         | 小型层理构造、波痕,厚度一般大于 3m  | 大型层理、波痕、槽模        |
| 伴生矿物   | 胶磷矿                         | 胶磷矿、黄铁矿              | 铁矿                |
| 生物化石   | 鱼齿化石、微体化石                   | 鱼齿化石                 | 一般无化石             |

注:CS = 凝缩段;TST = 海侵体系域;HST = 高位体系域;LST = 低位体系域。

表 2 本文倡导的海绿石分类体系、形成机理及特征

Table 2 Classification system, genetic mechanism and characteristics of glauconite proposed in this paper

| 海绿石分类     |       | 形成机理                 | 形成作用                     | 形态特征                            |
|-----------|-------|----------------------|--------------------------|---------------------------------|
| 按成因机制     | 原生海绿石 | 自生淀胶理论               | 胶结作用                     | 胶结物状、胶体状、包壳或薄膜状、内膜状、海绿石晕边       |
|           |       | 假形置换理论               | 胶结作用和交代作用                |                                 |
|           | 次生海绿石 | 层性点阵理论               | 溶蚀作用和成熟作用(实质为交代作用和重结晶作用) | 颗粒状、色素侵染状,交代假象状                 |
|           |       | 颗粒绿化理论               |                          |                                 |
| 按是否搬离生成地点 | 原地海绿石 | 原地生成,未再搬运            | 胶结作用或交代作用                | 颗粒状、交代假象状、胶结物状、色素侵染状、包壳或薄膜状、内膜状 |
|           | 异地海绿石 | 短距离搬离生成地点,但未脱离原来沉积环境 | 搬运、沉积作用,表面再次胶结作用         | 晕边状等                            |
|           | 碎屑海绿石 | 搬离原来生成地点,脱离原来生成环境    | 搬运、沉积作用                  | 颗粒状比较多见,也可见其他各种形态               |

接生成的海绿石,实质上是成岩期胶结作用而形成的胶结物,可以形成胶结物状、胶体状、包壳状或薄膜状海绿石。这种海绿石包括了 Banerjee 提出的假形置换理论形成的微小海绿石<sup>[17-18]</sup>。但如果成岩过程中孔隙水中存在富含 K、Si 和 Fe 等形成海绿石的元素条件和弱还原、弱碱性环境,完全可以直接沉淀出成熟度较高的海绿石,即以胶结物的形式存在,笔者将此类海绿石的形成理论定为“自生淀胶理论”。如 Oriente 盆地白垩系石英砂岩除了大部分碎屑状(图 3a)和包壳状(图 3c,图 4)海绿石外,也存在胶结物状海绿石(图 3g,图 6a);在北京昌平龙山马岭组广泛发育胶结物状海绿石,且大部分发生了氧化作用(图 6b),形成斑块状铁质石英砂岩;北京延庆高于庄组底部石英砂岩中也发育了薄层胶结物状的海绿石(图 6c);天津蓟县杨庄组石英砂岩中也发育大量胶结物状的海绿石(图 6d);北京雁翅长龙山组(图 6e)、张家口庞家堡串岭沟组(图 6f)也都发育胶结物状的海绿石。因

此,大量胶结物状海绿石的存在都说明了如果存在弱还原、弱碱性条件和大量 K、Si、Fe 和 Al 等海绿石形成所需的元素,是可以从孔隙水中直接沉淀形成原生海绿石的。

次生海绿石是海绿石交代其他先期存在的矿物或颗粒如黑云母、生物碎屑等颗粒发生海绿石化作用而形成的,主要是交代成因的海绿石,实质上包括了层点阵理论和颗粒绿化理论形成的海绿石,海绿石形态主要包括颗粒状(图 3a)、色素侵染状(图 3i)和交代假象状(图 3e,f)。

晕边状海绿石是早期的次生颗粒状海绿石在后期表面又发生了胶结沉淀而形成的,是次生海绿石和原生海绿石复合成因。因此,根据海绿石的这些形态可以很简单地判断是“原生”还是“次生”海绿石(表 2)。

原生海绿石和次生海绿石进一步根据是否搬离原来生成地点都可以分为“原地”和“异地”海绿石。上述这种海绿石的分类体系更趋于科学、简单、系统化,

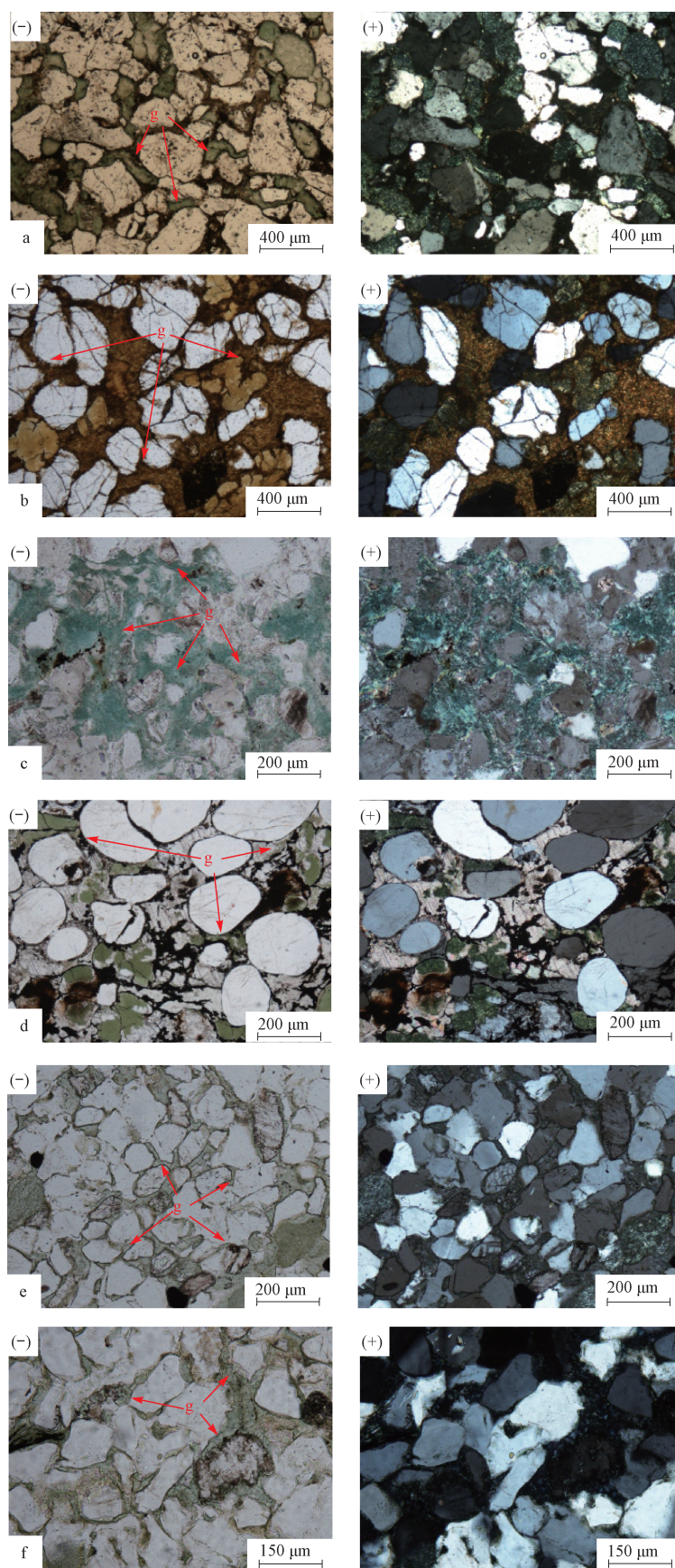


图6 原生胶结物状海绿石实例及特征

Fig. 6 Research cases and characteristics of authigenic glauconite cement

- a. Oriente 盆地白垩系石英砂岩;b. 北京昌平青白口系下马岭组石英砂岩,胶结物状海绿石大部分发生氧化作用;c. 北京延庆长城系高于庄组石英砂岩;  
d. 天津蓟县蓟县系杨庄组石英砂岩;e. 北京雁翅青白口系长龙山组石英砂岩;f. 张家口庞家堡长城系串岭沟组石英砂岩  
g. 胶结物状海绿石

有助于根据简单的形态特征进一步分析海绿石的形成过程和形成环境。

## 4.2 研究海绿石的地质意义

### 4.2.1 海绿石的环境意义

大量的研究表明,现代沉积环境中的原地海绿石主要形成于 30 ~ 500 m、沉积作用缓慢的大陆架到大陆坡的上部<sup>[4,6]</sup>。由于海绿石化过程需要一个稳定的弱氧化、弱还原半封闭的环境,原地海绿石通常集中分布于相对较薄的地层(小于 1 ~ 3 m)中,并普遍作为海侵体系域凝缩段的识别标志之一<sup>[16]</sup>,这使得海绿石在记录古水深和古地理环境方面具有重要的作用<sup>[43-44]</sup>。因此,长期以来海绿石作为一种典型的沉积相指示矿物广泛应用于沉积环境分析、沉积速率分析、层序地层划分、区域地层对比、构造演化分析等方面<sup>[45]</sup>。但经历了长期的相对海平面升降运动或后期的成岩改造等作用后,海绿石以准原地或碎屑海绿石的形态富存于各类岩石中。因此,在进行沉积环境分析时,首先要根据判别标准确定海绿石的类型,只有原地和准原地海绿石可为识别凝缩段、层序地层划分和区域地层对比提供有利的资料,而异地海绿石可以指示再次搬运的水动力条件和搬运距离。

另一方面,各种形态的海绿石不管是作为交代物还是胶结物,都是经历了一定的成岩作用而形成,海绿石的富集都可以用于指示成岩环境、分析成岩演化序列及划分成岩阶段<sup>[46]</sup>。

### 4.2.2 海绿石的定年应用

地质年代表中最近的 250 Ma 中,40% 的年龄数据是由海绿石中 K - Ar 测年提供的<sup>[10,47]</sup>,因为高成熟度的原地海绿石具云母型结构,其晶格十分有利于 Ar 的保存,且与海水间达到了同位素平衡。然而,大量的 K - Ar 年龄结果表明这种方法使地层年龄普遍年轻化,Smith(1998)<sup>[48]</sup>提出的海绿石中<sup>40</sup>Ar - <sup>39</sup>Ar 测年技术成功解决了这一问题,不过由于海绿石中含有膨胀层,这种方法仍然会引起一定的误差。Gopalan(2008)<sup>[49]</sup>和 Cecil(2011)<sup>[50]</sup>尝试使用海绿石中 K - Ca 和 Rb - Sr 技术进行地层年龄的测定,但结果显示年龄仍会有一定的偏差。有些样品的海绿石是成岩阶段形成,因此测出的年龄要小于沉积年龄。所以,鉴别海绿石的成因是进行 K - Ar 测年的基础。总体而言,海绿石绝对年龄没有火成岩那么准确,但在缺乏可靠高温矿物的地层中,海绿石仍能为沉积物的年龄提供较准确的参考。

另外,黄宝玲等(1998)<sup>[47]</sup>根据海绿石化作用主要发生在海侵期这一观点,提出一系列连续的海绿石化

的颗粒,能够反映最初海绿石化以后的海平面变化情况。海绿石<sup>40</sup>Ar - <sup>39</sup>Ar 年龄分布图中的空隙,反映了海绿石化间断的次数,从而反映全球海平面变化的情况,这对全球海平面变迁的精确校准、对全球海平面变化引起的全球气候的变化研究都极其重要<sup>[51]</sup>。

### 4.2.3 海绿石对储层物性的改造作用

Hesselbo(1996)<sup>[52]</sup>研究新泽西含海绿石砂岩发现其自然伽马响应远高于正常砂岩,但当时未被予以重视,这使得海绿石石英砂岩常被解释为含泥砂岩而遗漏可能的油气储层,如厄瓜多尔 Orient 盆地,白垩系砂岩中普遍发育海绿石,而且具有一定的工业产能<sup>[38]</sup>。Diaz 等(2003)<sup>[53]</sup>认为海绿石富集对砂岩储层孔隙度、渗透率、润湿相都具有影响,而海绿石与其他粘土矿物不同,它的富集使储集层的物性向更加有利于油气储集和开发的方向变化。Kazerouni 等(2013)<sup>[39]</sup>对北海盆地重力流沉积中碎屑海绿石的研究也表明,海绿石在埋藏过程中,伊/蒙混层矿物的类型会发生改变,使颗粒边缘产生衬边孔隙,对储层有积极的改造作用。笔者观察 Oriente 盆地白垩系石英砂岩的铸体薄片发现,含有少量海绿石的石英砂岩中孔隙相对比较发育,而随着海绿石的含量增加,孔隙逐渐不发育。因此,对于海绿石的分布及其含量对储层物性的改造程度和影响机制还需要进一步深入研究和探讨。

## 5 结论

1) 海绿石的形成机理目前仍有争议,主要包括火山成因假说、生物成因假说、层形点阵理论、颗粒绿化理论和假形置换理论,而这些理论仍然无法解释胶结物状海绿石的成因。

2) 原地和异地海绿石在颜色、成熟度、元素组成、微构造、表面形态、伴生矿物和生物化石、沉积特征等方面均有明显的差异。

3) 建议按照“成因机制”将海绿石分为“原生”和“次生”两类。提出“自生淀胶理论”解释胶结物状、包壳状或薄膜状海绿石的形成。并进一步根据“是否搬离生成地点”分为“原地”和“异地”海绿石。

4) 海绿石在指示沉积环境、层序划分、成岩环境、K - Ar 同位素测年、储层改造等方面均具有广泛的应用。而海绿石的分布和含量对储层物性的改造程度及其影响机制还需要进一步深入研究和探讨。

## 参 考 文 献

- [1] Burst J F. Mineral heterogeneity in "glauconite" pellets [J]. The American Mineralogist, 1958, 43 (5): 481 - 497.
- [2] Odin G S, Matter A. De glauconiarum origine [J]. Sedimentology,

- 1981, 28(5): 611–641.
- [3] Odin G S, Fullaga P D. Geological significance of the glaucony facies [C] // Odin G S. Green Marine Clays; Developments in Sedimentology. Amsterdam: Elsevier, 1988: 295–332.
- [4] 周锡强, 李楠, 梁光胜, 等. 天津蓟县中元古界铁岭组叠层石灰岩中原地海绿石的沉积学意义[J]. 地质通报, 2009, 28(7): 985–990.
- Zhou Xiqiang, Li Nan, Liang Guangsheng, et al. Sedimentary significance of the autochthonous glauconite in stromatolitic limestones of the Mesoproterozoic Tieling Formation in Jixian, Tianjin, North China [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(7): 985–990.
- [5] Fischer H. Glauconite formation; discussion of the terms authigenic, perigenic, allogenic, and meta-allogenic [J]. Eclogae Geologicae Helveticae, 1990, 83(1): 1–6.
- [6] 梅冥相, 杨锋杰, 高金汉, 等. 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[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 146–158.
- Mei Mingxiang, Yang Fengjie, Gao Jinhan, et al. Glauconites formed in the high-energy shallow-marine environment of the late Mesoproterozoic; a case study from Tieling Formation at Jixian section in Tianjin, North China [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 146–158.
- [7] Stille P, Claeu N. The process of glauconitization; chemical and isotopic evidence [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1994, 117(3): 253–262.
- [8] Amorosi A. Detecting compositional, spatial, and temporal attributes of glaucony; a tool for provenance research [J]. Sedimentary Geology, 1997, 109(1–2): 135–153.
- [9] 李响, 蔡元峰, 胡修棉, 等. 藏西南札达白垩纪 Albian 期海绿石的矿物学特征及地质意义[J]. 地质论评, 2011, 57(1): 63–72.
- Li Xiang, Cai Yuanfeng, Hu Xiumian, et al. The mineralogical characteristics of Cretaceous Albian glauconite in Zanda, Southwestern Xizang (Tibet) of China and its geological implications [J]. Geological Review, 2011, 57(1): 63–72.
- [10] 陈淑慧, 李云, 胡作维, 等. 海绿石的成因、指相作用及其年龄意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(5): 971–979.
- Chen Shuhui, Li Yun, Hu Zuowei, et al. Genesis, diagnostic role and age significance of glauconites [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2014, 33(5): 971–979.
- [11] 朱福明, 朱明善. 现代沉积中海绿石的分选方法及其成因问题[J]. 矿物学报, 1985, 5(1): 80–84.
- Zhu Fuming, Zhu Mingshan. The separation of glauconite in modern sediments and the problem of its genesis [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1985, 5(1): 80–84.
- [12] 王玉文, 林振宏. 现代海洋沉积物中的海绿石[J]. 海洋科技资料, 1979, (4): 33–50.
- Wang Yuwen, Lin Zhenhong. Glauconite in modern marine sediments [J]. Marine Science Bulletin, 1979, (4): 33–50.
- [13] Hower J. Some factors concerning the nature and origin of glauconite [J]. The American Mineralogist, 1961, 46(3): 313–334.
- [14] Harder H. Syntheses of glauconite at surface temperatures [J]. Clays and Clay Minerals, 1980, 28(3): 217–222.
- [15] Banerjee S, Chatteraj S L, Saraswat P K, et al. The origin and maturation of lagoonal glauconites; a case study from the Oligocene Maniyara Fort Formation, western Kutch, India [J]. Geological Journal, 2012, 47(4): 357–371.
- [16] Amorosi A, Sammartino I, Tateo F. Evolution patterns of glaucony maturity: A mineralogical and geochemical approach [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2007, 54: 1364–1374.
- [17] Banerjee S, Bansal U, Pande K, et al. Compositional variability of glauconites within the Upper Cretaceous Karai Shale Formation, Cauvery Basin, India; Implications for evaluation of stratigraphic condensation [J]. Sedimentary Geology, 2016, 331: 12–29.
- [18] 汤东杰, 史晓颖, 马坚白. 中元古代海绿石: 前寒武纪海洋浅化变层深度的潜在指示矿物[J]. 地学前缘, 2016, 23(6): 1–17.
- Tang Dongjie, Shi Xiaoying, Ma Jianbai. Mesoproterozoic glaucony as a potential mineral proxy for shallow chemocline in the Precambrian [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(6): 1–17.
- [19] Amorosi A, Guidi R, Mas R, et al. Glaucony from the Cretaceous of the Sierra de Guadarrama (Central Spain) and its application in a sequence-stratigraphic context [J]. International Journal of Earth Sciences, 2012, 101(2): 415–427.
- [20] 苏双青, 传秀云, 马鸿文, 等. 海绿石的矿物学特征及应用研究 [J]. 化工矿物与加工, 2016, 45(2): 30–35.
- Su Shuangqing, Chuan Xiuwen, Ma Hongwen, et al. Mineralogical characteristics of glauconite and its application research [J]. Industrial Minerals & Processing, 2016, 45(2): 30–35.
- [21] Strickler M E, Ferrell R E. Fe substitution for Al in Glauconite with increasing diagenesis in the first Wilcox sandstone (Lower Eocene), Livingston Parish, Louisiana [J]. Clays and Clay Minerals, 1990, 38(1): 69–76.
- [22] Baoumy H M, Boulis S N. Glauconites from the Bahariya Oasis: An evidence for Cenomanian marine transgression in Egypt [J]. Journal of African Earth Sciences, 2012, 70(1): 1–7.
- [23] Baoumy H M, Boulis S N. Non-pelletal glauconite from the Campanian Qusseir Formation, Egypt: Implication for glauconitization [J]. Sedimentary Geology, 2012, 249(1): 1–9.
- [24] Amorosi A. Glaucony and sequence stratigraphy: a conceptual framework of distribution in siliciclastic sequences [J]. Journal of Sedimentary Research, 1995, B65(4): 419–425.
- [25] 陈丽蓉, 段伟民. 生物状海绿石的成因 [J]. 沉积学报, 1987, 5(3): 171–179.
- Chen Lirong, Duan Weimin. 1987. Formation of glauconite as infillings of organism [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1987, 5(3): 171–179.
- [26] Eder V G, Martín-Algarra A, Sánchez-Navas A, et al. Depositional controls on glaucony texture and composition, Upper Jurassic, West Siberian Basin [J]. Sedimentology, 2007, 54(6): 1365–1387.
- [27] 丁述理. 贵州纳雍地区龙潭组的海绿石特征及指相意义 [J]. 煤田地质与勘探, 1991, 19(4): 10–15.
- Ding Shuli. The property of glauconite and its facies-indicating significance in Longtan Formation Nayong District Guizhou Province [J]. Coal Geology & Exploration, 1991, 19(4): 10–15.
- [28] 常全明. 秦皇岛石门寨地区海绿石赋存特点及沉积环境研究 [J]. 唐山工程技术学院学报, 1992, (2): 54–58.
- Chang Quanming. Research on the concentration features and the sedimental context of glauconite in Shimenzhai Area, Qinhuangdao [J]. Journal of Tangshan Institute of Technology, 1992, (2): 54–58.
- [29] 吴健君. 苏南龙潭组的海绿石特征和沉积环境 [J]. 地层学杂志, 1992, 16(3): 210–215.
- Wu Jianjun. The property and sedimentary environment of glauconite

- of Longtan Formation in south Jiangsu Province[J]. *Journal of Stratigraphy*, 1992, 16(3): 210–215.
- [30] 武法东, 陆永潮, 陈平, 等. 东海西湖凹陷渐新统花港组海绿石的发现及其意义[J]. *沉积学报*, 1997, 15(3): 158–161.  
Wu Fadong, Lu Yongchao, Chen Ping, et al. The discovery and significance of glauconites in the Huangong Formation of the Oligocene, Xihu Depression, East China Sea[J]. *Acta sedimentologica Sinica*, 1997, 15(3): 158–161.
- [31] 王俊涛, 张永生, 宋天锐, 等. 内蒙古西乌珠穆沁旗阿木山组海绿石的特征及其沉积环境[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(2): 259–266.  
Wang Juntao, Zhang Yongsheng, Song Tianrui, et al. Characteristics and sedimentary environment of authigenic glauconite from limestone of the Amushan Formation in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2011, 30(2): 259–266.
- [32] Adriaens R, Vandenberghe N, Elsen J. Natural clay-sized glauconite in the Neogene deposits of the Campine Basin (Belgium) [J]. *Clays and Clay Minerals*, 2014, 62(1): 35–52.
- [33] Baldernann A, Warr L N, Grathoff G H, et al. The Rate and mechanism of deep-sea glauconite formation at the Ivory Coast-Ghana Marginal Ridge[J]. *Clays and Clay Minerals*, 2013, 61(3): 258–276.
- [34] Chafetz H S, Reid A. Syndepositional shallow-water precipitation of glauconitic minerals[J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 136(1): 29–42.
- [35] Chafetz H S. Paragenesis of the Morgan Creek Limestone, Late Cambrian, central Texas: Constraints on the formation of glauconite[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54: 1350–1363.
- [36] Wigley R, Compton J S. Oligocene to Holocene glauconite-phosphorite grains from the Head of the Cape Canyon on the western margin of South Africa[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54(11–13): 1375–1395.
- [37] 陈荣坤. 华北地台寒武纪沉积层序中关键地层单元—海绿石质凝缩层段[J]. *岩相古地理*, 1994, 14(6): 25–34.  
Chen Rongkun. Key stratigraphic units-glauconitic condensed sections in the Cambrian depositional sequences on the north China platform[J]. *Sedimentary facies and palaeogeography*, 1994, 14(6): 25–34.
- [38] 刘畅, 张琴, 谢寅符, 等. 厄瓜多尔 Oriente 盆地东北部区块白垩系层序地层格架及发育模式[J]. *沉积学报*, 2014, 32(6): 1123–1131.  
Liu Chang, Zhang Qin, Xie Yinfu, et al. Sequence stratigraphic framework and development model of the Cretaceous in Northeast Block, Oriente Basin, Ecuador[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(6): 1123–1131.
- [39] Kazerouni A M, Poulsen M L, Friis H, et al. Illite/smectite transformation in detrital glaucony during burial diagenesis of sandstone: A study from Siri Canyon-Danish North Sea[J]. *Sedimentology*, 2013, 60(3): 679–692.
- [40] Harris L C, Whiting B M. Sequence-stratigraphic significance of Miocene to Pliocene glauconite-rich layers, on- and offshore of the US Mid-Atlantic margin[J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 134(1): 129–147.
- [41] 徐勇航, 赵太平, 陈伟. 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[J]. *沉积学报*, 2010, 28(4): 671–675.  
Xu Yonghang, Zhao Taiping, Chen Wei. The discovery and geological significance of glauconites from the Paleoproterozoic Xiong'er Group in the Southern Part of the North China Craton[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(4): 671–675.
- [42] 邱传珠. 南海北部他生海绿石富集带物质组成和分布特征[J]. *热带海洋*, 1989, 8(1): 19–26.  
Qiu Chuanzhu. Mass composition and distributional characteristics of the allogenic glauconitic enriched zones in the northern south China sea[J]. *Tropic Oceanology*, 1989, 8(1): 19–26.
- [43] Banerjee S, Bansal U, Thorat V A. A review on palaeogeographic implications and temporal variation in glaucony composition[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 5(1): 43–71.
- [44] Hegaba O A, Serriy M A, Anana T I, et al. Facies analysis, glauconite distribution and sequence stratigraphy of the middle Eocene Qarara Formation, El-Minya area, Egypt[J]. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2016, 3(1): 71–84.
- [45] 范兴燕, 张研, 肖高杰, 等. 轮深地区寒武系台缘礁滩相储层预测[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(5): 793–803.  
Fan Xingyan, Zhang Yan, Xiao Gaojie, et al. Reservoir prediction of the Cambrian reef flat facies of platform margin in Lunshen area[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(5): 793–803.
- [46] 李朋威, 罗平, 陈敏, 等. 塔里木盆地西北缘上震旦统微生物碳酸盐岩储层特征与成因[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(3): 416–428.  
Li Pengwei, Luo Ping, Chen Min, et al. Characteristics and origin of the Upper Sinian microbial carbonate reservoirs at the northwestern margin of Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3): 416–428.
- [47] 黄宝玲, 高永军, 穆治国. 单颗粒海绿石激光 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年的新突破[J]. *地球科学进展*, 1998, 13(4): 90–91.  
Huang Baoling, Gao Yongjun, Mu Zhiguo. Introduction to the Single-grain  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  Dating of Glauconites[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1998, 13(4): 90–91.
- [48] Smith P E, Evensen N M, York D. Single-grain  $\text{Ar}-40-\text{Ar}-39$  ages of glauconites: Implications for the geologic time scale and global sea level variations[J]. *Science*, 1998, 281(5356): 1517–1519.
- [49] Gopalan K. Conjunctive K-Ca and Rb-Sr dating of glauconites[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247: 119–123.
- [50] Cecil M R, Ducea M N. K-Ca ages of authigenic sediments: examples from Paleozoic glauconite and applications to low-temperature thermochronometry[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2011, 100(8): 1783–1790.
- [51] 吴文祥, 张海翔, 李占东, 等. 层序地层地球化学方法在烃源岩评价中的应用—以海拉尔盆地贝尔凹陷为例[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(4): 701–710.  
Wu Wenxiang, Zhang Haixiang, Li Zhandong, et al. Sequence stratigraphic geochemistry and its application in evaluation of source rocks: taking Beier sag of Hailar Basin as an example[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(4): 701–710.
- [52] Hesselbo S P. Spectral Gamma-Ray logs in relation to clay mineralogy and sequence stratigraphy, Cenozoic of the Atlantic Margin, offshore New Jersey[J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 1996, 150: 411–422.
- [53] Diaz E, Prasad M, Mavko G, et al. Effect of glauconite on the elastic properties, porosity, and permeability of reservoir rocks[J]. *The Leading Edge*, 2003, 22(1): 42–45.