

河北秦皇岛柳江盆地新元古界海绿石

矿物特征与形成环境研究

——以鸡冠山长龙山组为例

褚庆忠, 犹遵艳*, 林景昱, 张宏远, 韩森伟, 高文龙, M. K. HAMZA ISSA

燕山大学车辆与能源学院, 河北秦皇岛 066004

摘 要: 在河北秦皇岛柳江盆地鸡冠山新元古界青白口系长龙山组石英砂岩中发现有海绿石。对海绿石宏观特征分析表明, 砂岩中海绿石的含量随着颗粒直径的减小而增大, 含量大多为 5%~20%。综合野外露头勘验、岩石薄片显微镜下观察和样品扫描电镜观察, 对海绿石微观特征分析表明, 长龙山组大多为晕边状和颗粒状, 也可见其他形态, 分析认为该区海绿石属于低成熟-成熟的层内准原地型海绿石。柳江盆地鸡冠山海绿石处于弱还原条件, 其形成环境为弱水动力浅海环境, 且沉积物补给慢, 沉积速率缓慢, 与现代海绿石沉积环境较为相似。本区海绿石的发现及研究, 对于进一步研究该区层序地层特征、地层格架及区域地层对比具有重要意义。

关键词: 海绿石; 鸡冠山; 长龙山组; 沉积环境**中图分类号:** P578.94 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2021.092701**Mineral Characteristics and Formation Environment of Glauconite in Upper Archean of Liujiang Basin, Qinhuangdao, Hebei Province: A Case Study of Changlongshan Formation in Jiguanshan**CHU Qing-zhong, YOU Zun-yan*, LIN Jing-yu, ZHANG Hong-yuan,
HAN Sen-wei, GAO Wen-long, M. K. HAMZA ISSA

School of Vehicle and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004

Abstract: Glauconite is found in the quartz sandstone of Upper Archean Qingkoubai Changlongshan Formation in Jiguanshan, Liujiang Basin, Qinhuangdao, Hebei Province. The analysis of the macroscopic characteristics of glauconite showed that the glauconite content in sandstone increases with the decrease in particle diameter, and the content is mostly 5%~20%. Based on field outcrop surveys, rock section microscopy observations, and sample scanning electron microscopy observations, the microscopic characteristics of glauconite in Changlongshan was determined to be mostly halo-edged and granular, although other forms were also observed. It is considered that the glauconite in this area belongs to low-mature quasi autochthographical glauconite in layers. The glauconite in Jiguanshan of Liujiang Basin is characterized by weak reduction, and its formation environment is a shallow water environment with weak hydrodynamic force, and its sediment supply and sedimentation are slow, which is similar to the modern glauconite sedimentary environment. The discovery and study of glauconite in this area is of great significance for further study of sequence stratigraphic characteristics, stratigraphic framework, and regional stratigraphic correlation.

Key words: glauconite; Jiguanshan; Changlongshan Formation; sedimentary environment

本文由河北柳江盆地地质遗迹国家级自然保护区“柳江盆地野外地质实习资源开发、整合与管理项目”(编号:冀林草发[2019]43号)资助。
收稿日期: 2021-06-07; 改回日期: 2021-09-20; 网络首发日期: 2021-09-30。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 褚庆忠, 男, 1974年生。博士, 副教授。主要从事油气田开发地质研究。通讯地址: 066004, 秦皇岛市河北大街西段438号。

E-mail: qzhchu@ysu.edu.cn。

*通讯作者: 犹遵艳, 女, 1996年生。硕士研究生。主要从事油气田开发地质研究。E-mail: 2862886029@qq.com。

20 世纪 90 年代以来,国内外许多学者对海绿石的发育环境(Amorosi et al., 1995; Harris and Whiting, 2000; 汤冬杰等, 2016)、地球化学及岩石学、矿物学特征及其形成温度、盐度、pH 值(李东明等, 1996)、水深等因素进行了深入研究,甚至华北地区石盒子群中海绿石的来源及成因一度成为学者们关注的热点(李增学等, 2016),这些研究取得了一些可喜的成果。但还有些问题存在争议,尚需进一步开展研究。一般认为,海绿石是典型的海相沉积自生矿物,原地海绿石是“慢速、弱还原、较深水环境”的典型指相矿物之一,是海侵相的产物,含海绿石的地层在浅海沉积中常被作为海侵时期“凝缩段”及其相关沉积的识别标志之一(陈淑慧等, 2014)。不同时代不同地区沉积层内海绿石的分布不同,而且成因和类型也不同,这一点对沉积环境的分析来说十分重要(王俊涛等, 2011)。秦皇岛柳江盆地鸡冠山(图 1)发育一套新元古代滨浅海相沉积地层,也是秦皇岛地区最古老的沉积岩,该区海绿石丰度较大,可以为海绿石特征研究提供很好的样本。本文根据不同沉积环境下海绿石的产出特征,来对比分析长龙山组海绿石形成时所处的环境,并通过分析判断海绿石与水深的关系,这对海绿石特征与形成环境的研究有指示意义。

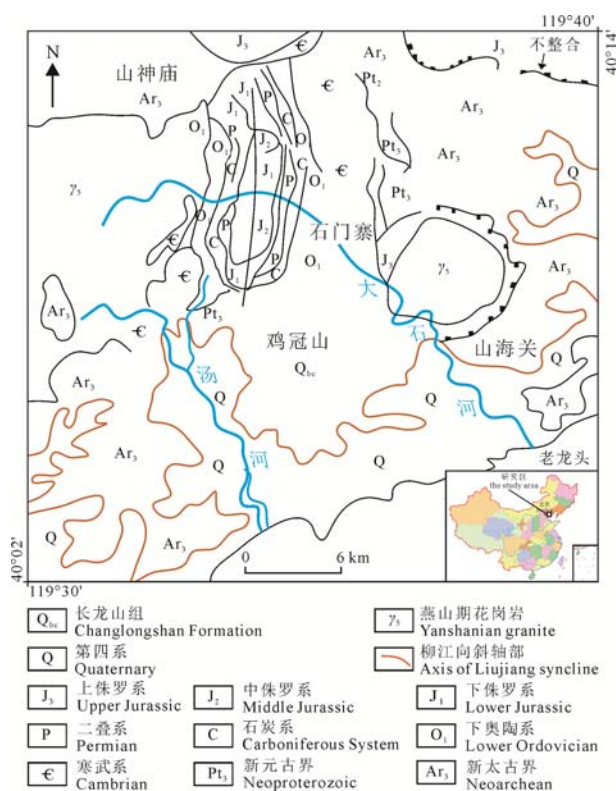


图 1 柳江盆地鸡冠山一带地质简图

(据谢启红和邵先杰, 2016)

Fig. 1 Geological map of Jiguanshan area in Liujiang Basin (after XIE and SHAO, 2016)

1 长龙山组大地构造演化和沉积环境

柳江盆地的地层属于华北型地层,新太古代末期(2486—2552 Ma)发生了大规模岩浆侵入,形成了大面积分布的花岗岩,大部分花岗岩受区域变质作用,转变为新太古界花岗片麻岩,是本区最古老的岩石,构成盆地的古老基底(邵先杰等, 2017)。

吕梁运动后,华北地台进入一个相对稳定时期。初期地台边缘部位断裂活动仍然比较强烈,地台北部出现呈北东方向延伸的燕辽裂陷槽,开始沉积长城系、蓟县系和青白口系(邵先杰等, 2017; 李晓波等, 2020)。

在晚元古代早期,华北地台由于边缘凹陷整体下降,北部陆表海不断扩大,青白口时期该区已经成为陆表海的一部分。青白口系(Pt₃Qb)距今有 800~1000 Ma 的历史(林建平等, 2015),堆积了长龙山组滨海相碎屑岩和浅海相泥灰岩。根据长龙山组的地球化学特征, Sr 与 Ba 的比值变化,表明长龙山组是有河流参与的潮汐及波浪影响的滨浅海沉积环境。开始海侵后,随着海侵范围的逐渐扩大,柳江盆地地区接受沉积,逐渐发育浅水陆棚相沉积。在长龙山组沉积期,沉积物的供应明显减弱,形成了丰富的海绿石细砂岩、粉砂岩,随着海退波浪作用增强,发育了进积型浅水陆棚及海滩相组合,形成了向上变粗的沉积序列(王立峰等, 2000)。

长龙山组地层中的海绿石含量比较高。向上逐渐过渡为灰绿色泥岩和薄层白云质灰岩地层,即景儿峪组(王兴, 2018)。据笔者野外露头观察,该区长龙山组和景儿峪组下部均发育有海绿石,判定景儿峪组和长龙山组整合接触,根据野外实测得到该区岩性及其沉积构造等相关数据,绘制柱状图(图 2)。

砂岩由下到上呈旋回变化,所发育的地层厚度不一,且分别发育了不同的层理。长龙山组下部为低水位体系域,海水缓慢上升时形成的海岸平原沉积,向上水体逐渐加深时形成的海岸平原沉积(刘振锋和郑桂森, 1994)。

2 海绿石矿物分布特征

本区长龙山组根据颗粒大小分为:砾岩、含砾粗砂岩、粗砂岩、中砂岩、细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩。砾岩和含砾粗砂岩分布于长龙山组底部,向上为粗砂岩、中砂岩、细砂岩、粉砂岩旋回分布,海绿石呈颗粒状和浸染状分布于石英砂岩中。通过观察发现本区海绿石的分布具有以下 3 个方面的特征:(1)海绿石在本区各层中的分布存在差异,存在

一个明显的富集区; (2)该组分可划分 5 个沉积单元, 每个沉积单元中海绿石的分布不一; (3)海绿石数量在不同颗粒大小的砂岩中的分布存在着明显的线性关系, 即砂岩颗粒越大海绿石含量分布越少, 颗粒越小海绿石含量分布越多。

2.1 海绿石在每层砂岩中的宏观分布特征

根据采样观察发现, 并不是每一层砂岩都含有海绿石, 海绿石仅分布在部分砂岩中(表 1)。从长龙山组底部至顶部, 不同颗粒的砂岩循环分布, 且海绿石在每个循环中的分布不一样。海绿石在底部砂岩中没有分布, 在中下部和中部零星分布, 集中分布在长龙山组上部, 该层位中海绿石在砂岩中的分布最高可达 50%(图 3)。

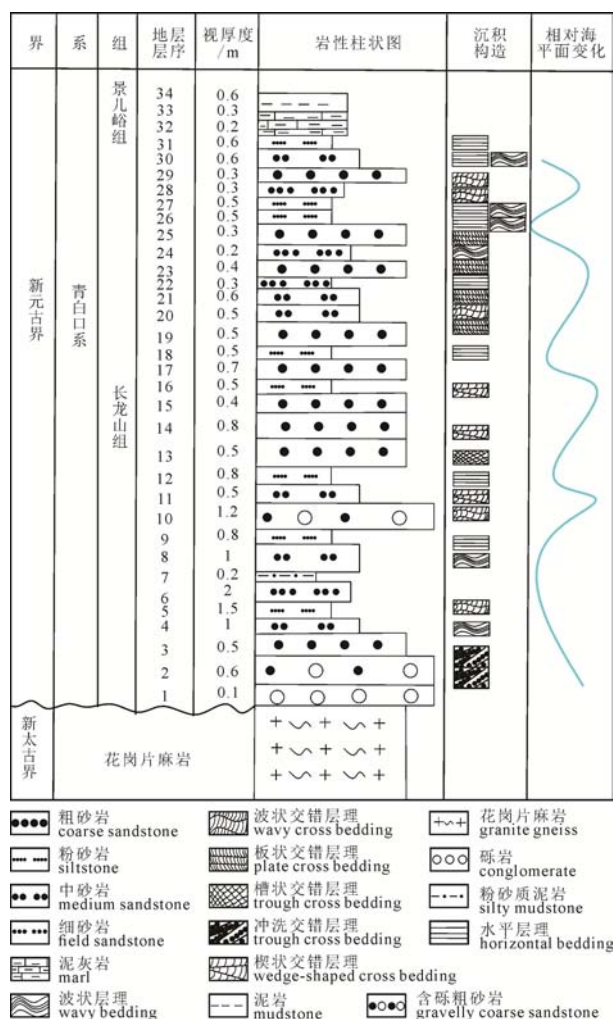


图 2 长龙山组沉积柱状图
Fig. 2 The sedimentary histogram of Changlongshan Formation

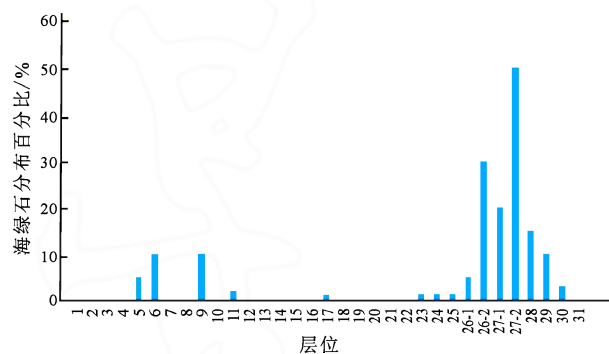
2.2 长龙山组沉积序列分类

长龙山组海绿石主要发育于含海绿石粉砂岩中。在上元古界海平面变化的背景下, 长龙山组在垂向上主要发育 5 种沉积序列, 并根据该 5 种沉积序列进一步划为 5 个沉积单元, 划分结果如下:

(1)砾岩—含砾粗砂岩沉积序列: 序列纵向分布于长龙山底部, 发育一套灰绿色砾岩, 砾石大小 5~20 mm, 砾石含量 65%, 上覆盖层为含砾粗砂岩, 底部见冲刷构造, 横向上分布不稳定, 呈透镜状分布(图 4a), 为后滨海滩脊。

(2)含砾粗砂岩—粗砂岩—中砂岩沉积序列: 序列底部为含砾粗砂岩, 向上发育的砂岩粒径逐渐变小, 顶部发育中砂岩(图 4b)。根据其垂向沉积构造, 初步判断该序列水流能量较强, 相对海平面较浅, 属于滨海的前滨地带上部, 向海倾斜, 位于高潮线与低潮线之间。据观察该沉积序列不含海绿石。

(3)粉砂岩—细砂岩—粉砂质泥岩—中砂岩—细砂岩—含砾粗砂岩—中砂岩—粉砂岩—粗砂岩沉积序列: 此序列海绿石增多, 底部发育含海绿石的细砂岩和粉砂岩, 根据岩石薄片鉴定, 海绿石含量在 5%~10%, 向上砂岩粒径变化为小→大→小→大, 中部发育含少量海绿石的灰白色中砂岩, 上覆盖层为不含海绿石的粗砂岩(图 4c), 序列主要位于上临滨相。



1—砾岩; 2, 10—含砾粗砂岩; 4, 8, 11, 20, 21, 30—中砂岩;
6, 24, 28—细砂岩; 5, 9, 12, 16, 18, 22, 26, 27, 31—粉砂岩;
7—粉砂质泥岩; 3, 13—15, 17, 19, 23, 25, 29—粗砂岩。
1—conglomerate; 2, 10—gravelly coarse sandstone; 4, 8, 11, 20, 21, 30—medium sandstone; 32—marl; 6, 24, 28—fine sandstone; 5, 9, 12, 16, 18, 22, 26, 27, 31—siltstone; 7—silty mudstone;
33, 34—mudstone; 3, 13—15, 17, 19, 23, 25, 29—coarse sandstone.

图 3 海绿石在长龙山组各层砂岩中的分布
Fig. 3 Distribution of glauconite in sandstone of Changlongshan Formation

表 1 放大镜下海绿石在不同层位中的百分比

Table 1 The percentage of glauconite in different horizons under a magnifying glass

层位	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
海绿石分布比/%	0	0	0	0	5	10	0	0	10	0	3	0	0	0	0	0
层位	17	18	19	21	22	23	24	25	26-1	26-2	27-1	27-2	28	29	30	31
海绿石分布比/%	1	0	0	0	0	1	1	1	5	30	20	50	15	10	3	0

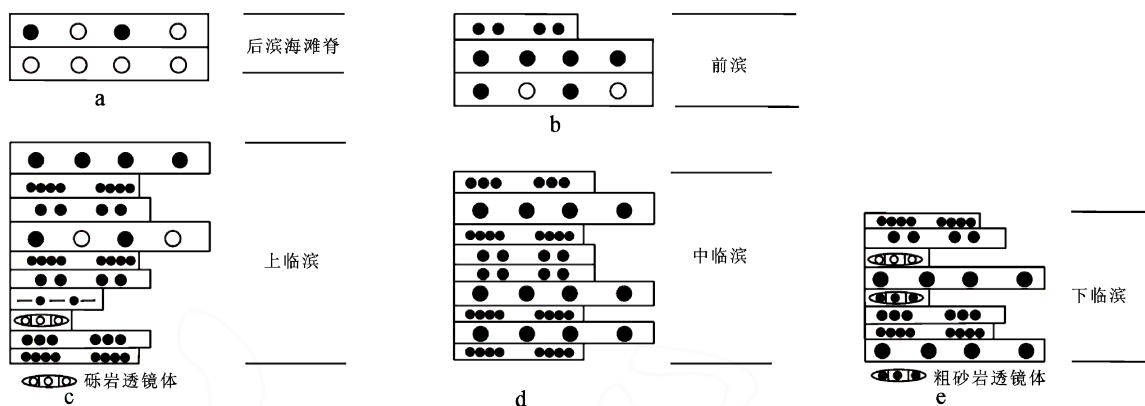


图 4 长龙山组海绿石沉积单元(图例同图 2)

Fig. 4 Lithology description of the greenstone bearing layer (see Fig. 2 for the legend)

(4)粉砂岩—粗砂岩—粉砂岩—粗砂岩—中砂岩—粉砂岩—粗砂岩—细砂岩沉积序列: 此序列底部为灰白色粉砂岩, 向上发育肉眼可见含浸染状的海绿石粗砂岩, 向上为灰白色中砂岩、黄绿色粉砂岩, 中上部发育灰白色粗砂岩, 且底部见冲刷面, 上覆盖层为含海绿石的灰白色细砂岩(图 4d), 序列位于中临滨相。

(5)粗砂岩—粉砂岩—细砂岩—粗砂岩—中砂岩—粉砂岩序列: 底部发育含少量铁质胶结物及少量海绿石的粗砂岩, 向上发育一套灰绿色和黄褐色粉砂岩互层, 灰绿色层的海绿石含量高达 30%, 黄褐色层的海绿石含量为 5%左右。但黄褐色粉砂岩的铁质含量高达 30%, 层面上可见大量白云母, 向上发育灰绿色粉砂岩且海绿石含量高达 50%。向上为含海绿石的细砂岩, 局部夹粗砂岩透镜体, 该层发育波状交错层理, 波长 10 cm, 波峰高 3 cm(图 5), 序列中上部发育含海绿石的粗砂岩, 局部夹砾岩透镜体, 上覆盖层为含海绿石的灰白色粉砂岩, 顶部发育含海绿石中砂岩(图 4e), 序列位于下临滨相。

序列(3)、(4)、(5)出露的下临滨、中临滨和上临滨沉积单元之间的叠置关系如图 6 所示。

板状交错层理多发育在水体较浅处, 波状交错层理多发育在水体较深处, 据此可以看出发育地层时的水体深浅。水体最深处为图 3 中编号 27 所对应的层位, 该层属于图 4e 序列对应的沉积单元——下临滨沙滩, 在鸡冠山野外露头观察的所处位置如图 6, 且海绿石含量最高, 最高达 50%左右, 多呈颗粒状和浸染状分布。

2.3 不同颗粒大小砂岩中海绿石的宏观分布

海绿石分布量与不同颗粒大小的砂岩, 以及该种砂岩所在的储层部位也有很大的关系, 如图 7 所示。

砂岩中海绿石的含量随着颗粒直径的减小而增大, 在四种砂岩中海绿石含量最高为粉砂岩, 粗

砂岩中含量大多为 1%左右。

3 海绿石成因机制与环境研究

3.1 海绿石的成因机制研究

3.1.1 海绿石成因理论分析

海绿石自被发现开始, 就引起了很多研究者的关注。层型点阵理论认为海绿石是以具 2: 1 型的层状结构的矿物降解为条件, 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黏土(张琴等, 2016), 但是该理论不能解释在碳酸盐岩(缺乏 2: 1 型层状结构)中的海绿石富集的问题(Odin and Matter, 1981);



图 5 长龙山组中发育的波状交错层理

Fig. 5 Wave cross-bedding developed in Changlongshan Formation



图 6 鸡冠山长龙山组不同沉积单元叠置关系

Fig. 6 Superimposition of different sedimentary units of Changlongshan Formation in Jiguanshan

日本学者提出的早期火山成因说认为海绿石的形成与火山喷发后岩浆冷却后形成的一种矿物质——浮石有关(大森昌卫等, 1980), 但之后有学者通过对温东海绿石进行的实验研究指出, 此观点难以解释该地区海绿石的形成(朱福明和朱明善, 1985)。综上这些理论都存在不同程度的争议。后期提出的颗粒绿化理论以及假形置换理论得到了广泛接受, 这个过程大概持续 200 年之久(Odin and Matter, 1981; 张琴等, 2016)。

颗粒绿化理论认为: 海绿石是经历了早期溶蚀作用和晚期的成熟作用(成岩作用)的结果(Banerjee et al., 2012)。由于原始颗粒内部的多孔性或存在裂

纹和裂隙, 所以粒状的原始底层总是非常疏松的(曲高生, 1983)。在这些颗粒孔隙中, 最先长出了绿色的海绿石晶体, 该形成过程分为四个阶段(图 8)。第一阶段: 叶片生长通过聚结作用发育房室状结构; 第二阶段: 房室状的组构填充整个孔隙, 颗粒呈现绿色, 最初沉淀的海绿石质蒙脱石吸收钾而逐渐演化为海绿石质云母(Odin et al., 1981); 第三阶段: 原生结构消失, 长出大且形状较好的雏晶, 其生长引起原始底层颗粒发生变形; 第四阶段: 颗粒埋在发育较差的海绿石矿物外壳下, 在原来不规则的表面形成一个圆滑的外壳, 颗粒圆度增加。

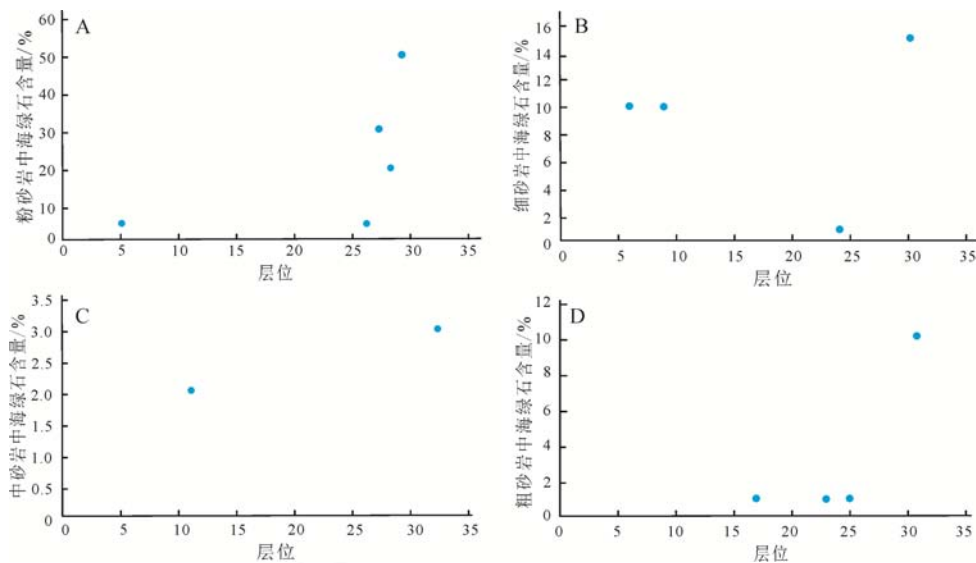


图 7 不同层位粉砂岩(A)、细砂岩(B)、中砂岩(C)、粗砂岩(D)中海绿石含量
Fig. 7 Glauconite content in siltstone (A), fine sandstone (B), medium sandstone (C), and coarse sandstone (D) in different horizons

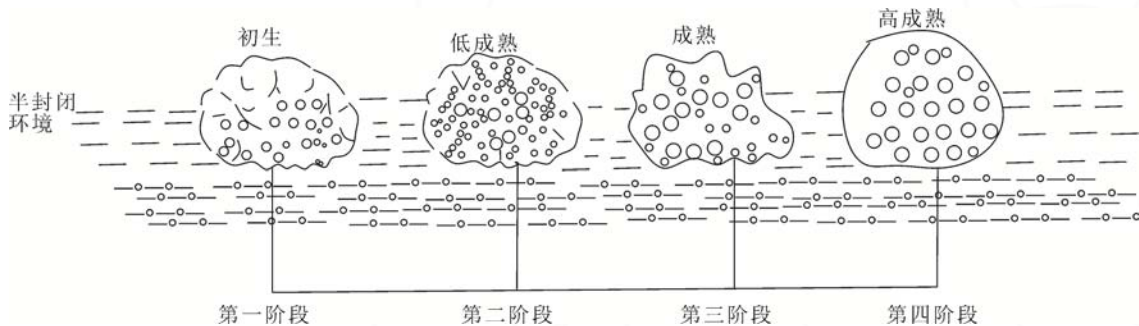


图 8 海绿石化过程中的颗粒演化示意图(据曲高生, 1983 修改)
Fig. 8 Particle evolution in the process of marine greenization (modified after QU, 1983)

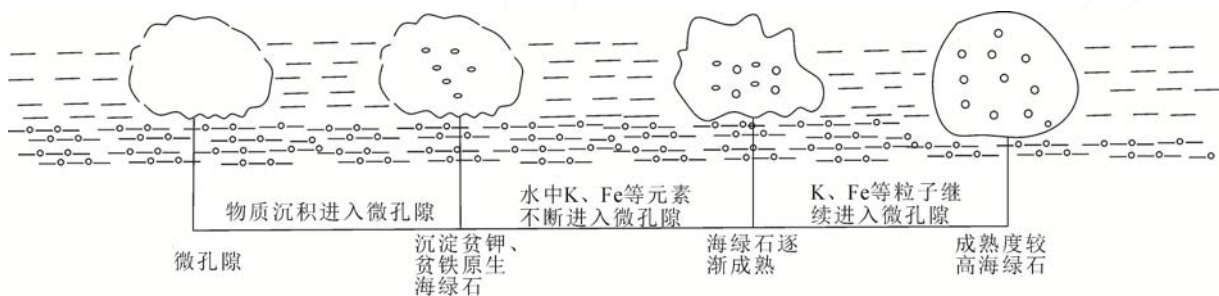


图 9 海绿石发生置换过程
Fig. 9 Glauconite replacement process

研究发现,海绿石不是先成矿物的蚀变产物,而是早期溶蚀-沉淀和后期的成熟过程产物(陈淑慧等, 2014)。从海绿石的形成角度分析,如果堆积速率不高,则颗粒可以长期处于海洋环境的作用之中,可持续受到相应的元素及碎屑物质的补给,达到高度发育与平衡(朱政源等, 2015)。

假形置换理论认为(Banerjee et al., 2016):成熟度较高的海绿石是由于微空隙沉淀了原生海绿石,最初的原生海绿石是贫钾和贫铁海绿石,随着物质不断的沉积,水中的 K、Fe 等元素进入孔隙,造成原来贫钾和贫铁的海绿石发生置换,这样就形成了成熟度比较高的海绿石。

笔者认为,微孔隙中伴随着水中含 K、Fe 原生海绿石的不断进入,海绿石逐渐发育成熟。成熟的海绿石在 K、Fe 等粒子的逐渐进入下向高成熟度发育(图 9)。海绿石化过程非常缓慢,且高成熟海绿石的形成大概需要 1 Ma(Odin and Fullagar, 1988)。

3.1.2 不同类型海绿石形态特征

显微镜下海绿石在形态上展现出来的多样性与海绿石的宿主矿物和成岩作用有着密切的关系,对海绿石的类型划分有着重要的指示作用(张琴等, 2020)。

(1) 颗粒状、椭圆状

砂岩中的海绿石颜色多为淡绿色,粒度在几十个微米,呈零星状散布在其它矿物颗粒之间,也可见暗绿色椭圆状(图 10A, B)。

(2) 色素浸染状

此类海绿石的外形受控于孔隙形态,而且一般具有浸染状边缘(常全明, 1992)(图 10C, D)。

(3) 晕边状

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 10E)。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(张琴等, 2016)。

(4) 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(张琴等, 2016)(图 10F)。

(5) 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(图 10G, H)。

3.1.3 海绿石成熟度分析

颜色是海绿石成熟度的标志之一。在海绿石化作用的初始阶段,形成的是淡黄色的海绿石质黏土,随后逐渐变为深绿色和墨绿色的海绿石。未成熟海绿石是一种柔软的黏土矿物,即使经过短距离搬运

也会发生塑性变形(李响等, 2011)。海绿石在显微镜下未发现明显的塑形变形,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)。颗粒的颜色呈翠绿色,颜色越深,磨圆度越好。在扫描电镜下观察呈玫瑰花状,表明海绿石的成熟度较低。这类海绿石磨圆度好,颜色鲜艳,说明沉积时已经硬化,是经过搬运并沉积的产物(陈瑞君, 1983)。

通过扫描电镜观察(图 11)并分析认为,鸡冠山海绿石有低成熟状态和成熟状态两种类型。

3.1.4 海绿石类型分析

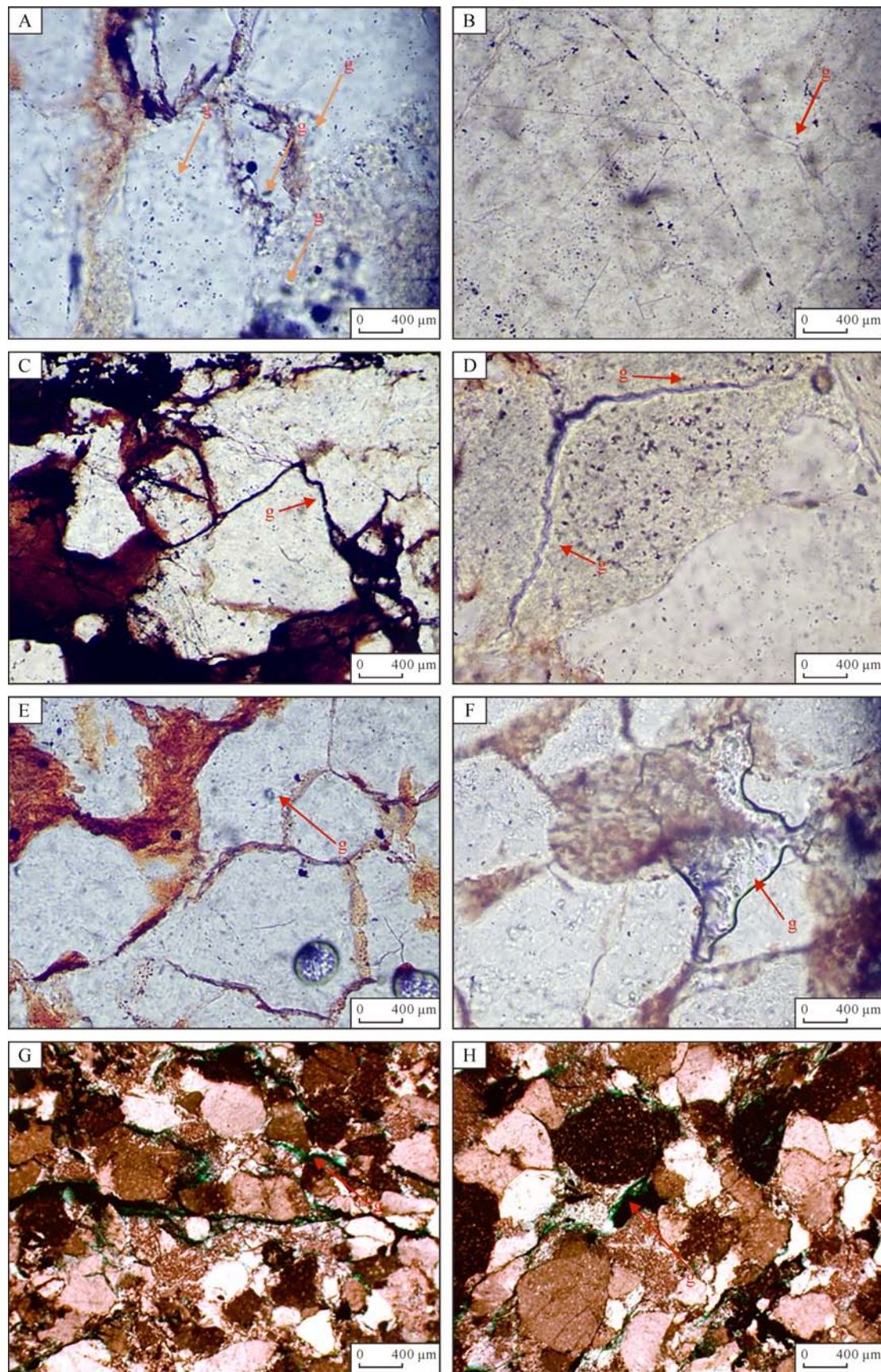
海绿石大多分为原地海绿石和异地碎屑海绿石。含海绿石灰岩中颗粒状海绿石以黄绿色到深绿色为主,可见 V 型裂痕,被裂隙切穿的海绿石未发生相对移动,为原地海绿石(陈瑞君, 1983)。原地海绿石由于没有经历过搬运改造,因此原始形态保留完好,常以团粒形态产出,粒度偏粗,磨圆度好。后来有研究者进一步提出将异地海绿石分为准原地或碎屑海绿石(Fischer, 1990)。准原地海绿石是通过搬运、沉积作用或表面再次胶结作用形成的,在形成过程中短距离搬离生成地点,但是没有脱离原来的沉积环境,常见的颗粒形态为晕边状;碎屑海绿石是通过搬运、沉积作用形成的,其形成过程中会搬离原来的生成地点,并且脱离原来生成的环境,常见的形态是颗粒状。

异地海绿石常集中于大型水平层理、交错层理、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(张琴等, 2016)。本研究中,通过对比原地海绿石和异地海绿石的成熟度、颜色、颗粒形态、表面特征、微观结构、层序发育位置、沉积特征、伴生矿物、生物化石来判断鸡冠山海绿石的类型(表 2)。

该区发育有明显的层理结构和波痕。可依据沉积特征判断该区海绿石为异地海绿石。

利用显微镜下观测方法,观察海绿石的显微结构及粒级特征,进一步判定海绿石的形态特点(张田等, 2016)。镜下观察本区含海绿石的样品,其海绿石形态特征如图所示(图 10, 图 11)。颗粒形态可见晕边状和颗粒状等,微观结构多见细小颗粒状,颜色可见翠绿色和黄绿色。该区海绿石主要集中该段水体向上逐渐变深,属于海侵体系域且发现有伴生矿物黄铁矿。

综上所述,将柳江盆地鸡冠山地区的海绿石主要归属于低成熟-成熟的层内准原地型海绿石,并经历了一定程度风暴或潮汐流作用的搬运改造。



A—颗粒状海绿石; B—正交光, 椭圆状海绿石; C—20 倍正交光, 沿裂缝侵染状海绿石; D—40 倍正交光, 沿裂缝侵染状海绿石;
E—晕边状海绿石; F—薄膜状海绿石; G、H—单偏光下, 胶结状海绿石。

A—granular glauconite; B—orthogonal light, elliptical glauconite; C—twenty times orthogonal light, along crack infected glauconite;
D—forty times orthogonal light, along crack infected glauconite; E—halo shaped glauconite; F—film shaped glauconite;
G, H—cemented glauconite under single polarized light.

图 10 鸡冠山各种形态海绿石显微照片特征

Fig. 10 Micrograph characteristics of various forms of glauconite in Jiguanshan

3.2 海绿石形成环境研究

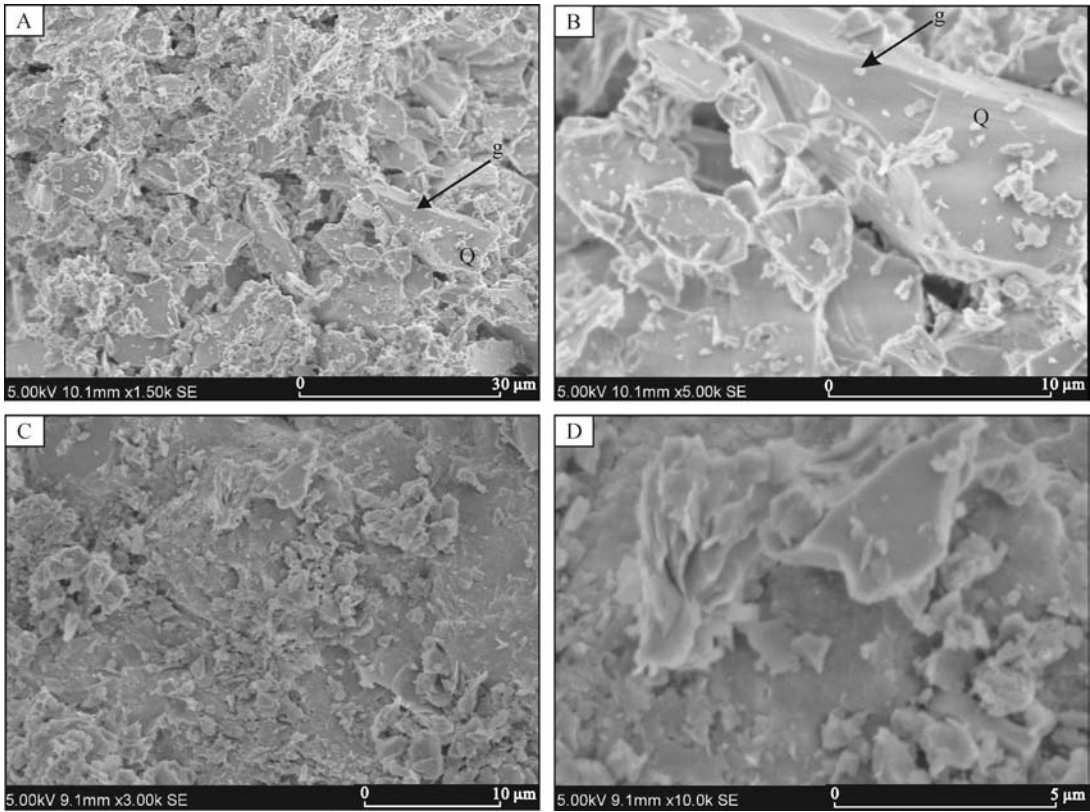
“层状格子理论”表明海绿石的一般的形成环境比原始物质的矿物学条件更为重要(曲高生, 1983)。因此对海绿石形成环境的研究是极其重要的, 本研究通过调研现代海绿石形成环境, 再类比判断鸡冠山海绿石的形成环境。

3.2.1 现代海绿石形成环境

现代大陆架底质沉积物中广泛分布有海绿石,

以南海大陆架北部为重点。陈瑞君(1983)从海绿石的形成介质条件方面, 探讨南海北部湾滨岸浅滩胶结较松散的长石石英砂岩海绿石的形成环境, 发现海绿石的形成与沉积环境有着密切的关系。

黄杏珍(1982)在研究现代海绿石含量变化与沉积环境中, 发现大陆架沉积环境在很大程度上受入海的大型河流的影响, 在东海从长江向东南海域, 海绿石含量逐渐增加(图 12)。



A、B—海绿石的细小无定形颗粒状结构; C、D—玫瑰花状海绿石; g—海绿石; Q—石英。
A, B—fine amorphous granular structure of glauconite; C, D—rosette glauconite; g—glauconite; Q—quartz.

图 11 鸡冠山海绿石颗粒表面形态特征

Fig. 11 Surface morphology of glauconite in Jiguanshan

表 2 原地和异地海绿石的特征对比(据张琴等, 2016 改)

Table 2 Lithology description of the greenstone bearing layer (modified after ZHANG et al., 2016)

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
颜色	深绿色到翠绿色	翠绿色到黄绿色	常被氧化呈棕色
颗粒形态	颗粒状、碎屑假象状、内膜状、胶体状、色素浸染状、包壳状	晕边状常见, 也可见其他形态	颗粒状比较多见, 也可见其他各形态
成熟度	高成熟	低成熟到成熟	低成熟到高成熟
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	凝缩段、海侵体系域、高位体系域下部	海侵体系域	主要为低位体系域
沉积特征	缺乏层理构造, 呈薄层状, 厚度小于 3 m	小型层理构造、波痕, 厚度一般大于 3 m	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

河口及滨海潮汐带沉积速率大, 水动力条件较强, 多为氧化-弱氧化环境, 该段海绿石含量低; 浅海大陆架带相对河口及滨海潮汐带沉积速率和水动力条件都减弱, 海绿石含量增加; 大陆架边缘带, 沉积物以粗、细砂为主, 相对于浅海大陆架带离河口、岸带距离更远, 陆源沉积物补给慢, 沉积作用缓慢, 海绿石含量丰富; 随着水深度增加, 水温降低, 海绿石的含量降低。对现代海洋表层沉积物取样分析表明, 海绿石是典型的浅海环境的指相矿物, 主要形成于沉积作用缓慢的外陆架和大陆斜坡上部, 水深范围为 50~500 m, 一般为 100~200 m 的环境(陈淑慧等, 2014)。

3.2.2 柳江盆地鸡冠山海绿石形成氧化还原条件

地质历史中海绿石的发育主要有早古生代和晚中生代两个峰期, 这些海绿石主要形成于温带、亚热带气候条件下, 分布于各个分散的克拉通地块中, 与海平面升高和大陆架地区低的沉积速率有关。根据所采集的实验样品, 进行海绿石宏观、微观产出研究, 及海绿石形成的介质条件等方面调查, 对秦皇岛柳江盆地鸡冠山新元古界海绿石矿物形成环境进行初步判断。

本区存在着一个明显的互层, 即地层 26-1 与地层 26-2。地层 26-1 为黄褐色粉砂岩, 铁质胶结, 该层的铁质含量高达 30%, 海绿石含量仅为 5%; 地层 26-2 为黄绿色粉砂岩, 没有铁质含量, 海绿石含量达 30%。这种海绿石与铁质矿物属于伴生关系, 极有可能是海绿石在氧气充足的情况下遭受风化作用先转化为褐铁矿, 再进一步氧化为赤铁矿, 而在氧气不足的条件则依然保持海绿石的形态生长, 所以出现了海绿石和铁质伴生的现象(张琴等, 2020)。

海绿石周围的黑色黄铁矿晶体初步认为是华

北地台上元古界滨浅海处于弱还原的特点环境。

3.2.3 柳江盆地鸡冠山海绿石形成水动力条件

据野外露头观察发现, 海绿石产于细粒石英砂岩或粉砂岩中。含量占 10%~20%, 主要呈胶结物状出现, 是成岩作用阶段早期形成的。有一部分呈碎屑出现, 颗粒被磨圆和分选, 和周围的砂粒、粉砂粒度相近, 是同生作用期形成的。且碎屑分选、磨圆度均好, 表明海绿石形成时水体较浅。

不同砂岩发育了不同的层理, 含砾粗砂岩层、粗砂岩层多发育冲洗交错层理、楔状交错层理、槽状交错层理、波状交错层理; 中砂岩层发育有波状层理、平行层理、波状交错层理、板状交错层理、楔状交错层理; 细砂岩多发育楔状交错层理、波纹层理、水平层理; 粉砂岩多发育水平层理、波纹层理、楔状交错层理、波状交错层理; 泥质粉砂岩发育水平层理(图 13)。并且在该区域地层中, 细砂岩层局部夹有粗砂岩透镜体(表明该层遭受过大波浪突然冲击)、砾岩透镜体, 粗砂岩层局部夹砾岩透镜体。

槽状交错层理所代表的水动力条件相对较强, 其次是板状交错层理、楔状交错层理和波状交错层理, 水平层理是低能或静水环境的标志之一, 也是细粒沉积物中最主要的层理类型。岩石粒级常是粉砂级和泥级(张洲和周敏, 2008)。对比现代海绿石的形成环境, 再结合图 2 地层中 1—31 小层对应的层理, 可以判断出: 自长龙山底部向上, 1—12 小层的水动力条件较强, 该层段的海绿石含量低; 到 13 层水动力条件达到最强, 该层内没有发现海绿石; 14—25 层水动力条件相对减弱, 海绿石含量低; 26—27 层发育水平层理、波纹层理, 水动力条件相对其他地层最弱, 且海绿石含量为 20%~50%。

再者, 结合扫描电镜观察海绿石的晶体排列情况, 当晶形呈定向稳定排列时, 说明海绿石形成

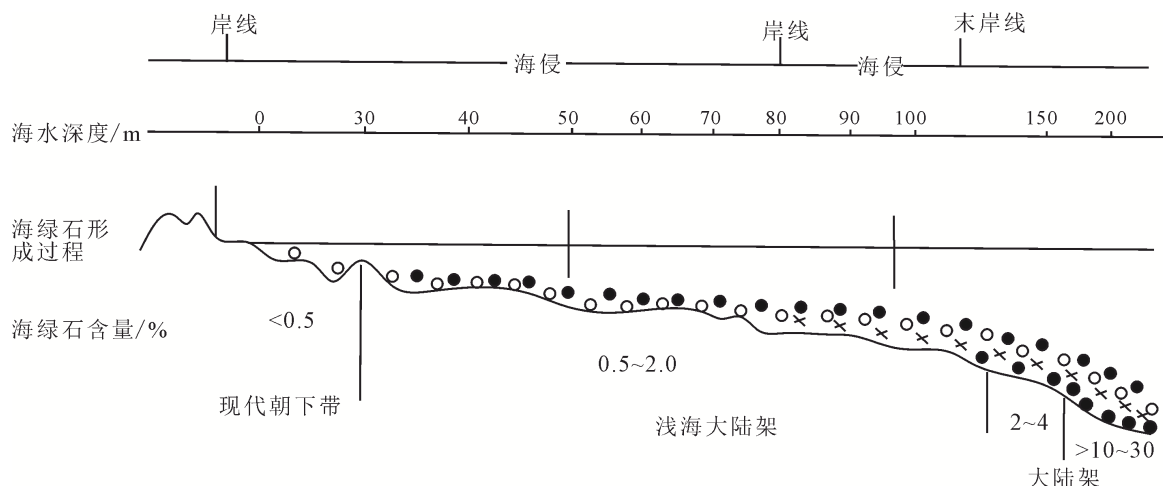
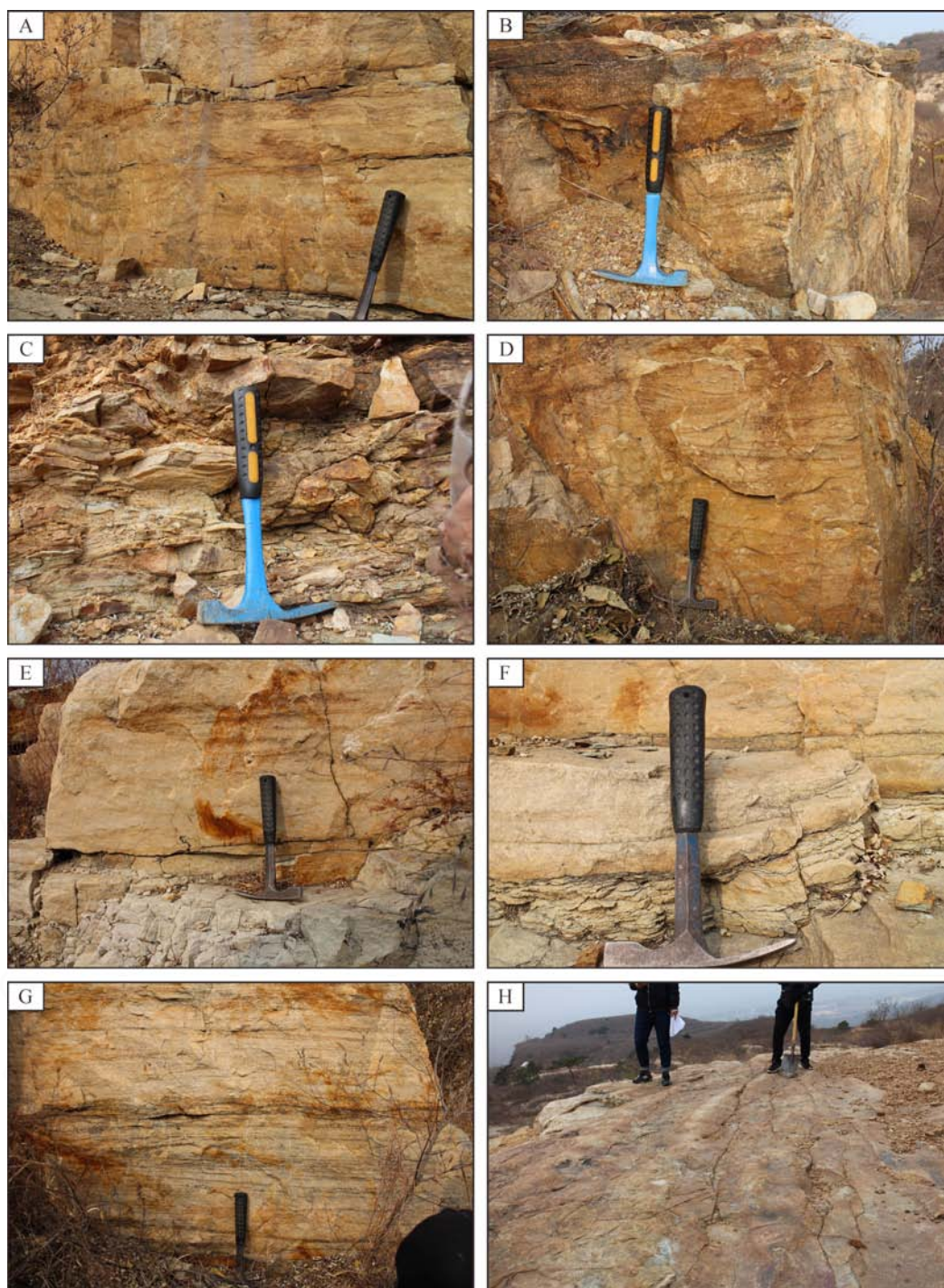


图 12 南海大陆架北部现代海绿石沉积环境(据黄杏珍, 1982 修改)

Fig. 12 The modern glauconite sedimentary environment in the northern continental shelf of the South China Sea (modified from HUANG, 1982)



A—槽状交错层理; B—板状交错层理; C—波状交错层理; D—楔状交错层理; E—冲洗交错层理;
F—水平层理; G—波状层理; H—大型波痕。

A—trough cross-bedding; B—tabular cross-bedding; C—wavy cross-bedding; D—wedge cross bedding;
E—wash cross-bedding; F—horizontal bedding; G—wavy bedding; H—large ripple marks.

图 13 鸡冠山长龙山组发育的层理类型

Fig. 13 Bedding types of the Changlongshan Formation in Jiguanshan

时水动力条件较弱,反之,则水动力条件较强(张田和王辰昊, 2017)。由图 11 可以看出扫描电镜下海绿石排列并不紊乱,因此,进一步证明了鸡冠山新元古代时期整体水动力条件较弱。

综合分析认为,柳江盆地鸡冠山海绿石处于弱还原的环境,其形成环境为弱水动力浅海环境,且沉积物补给慢,沉积作用缓慢。

4 结论及展望

4.1 结论

本文通过野外露头、显微镜和扫描电镜对鸡冠山海绿石砂岩的观察,研究了该区海绿石矿物的特征与形成环境,得出如下结论:

(1)该区海绿石在不同颗粒大小砂岩中的分布

存在明显的线性关系,即颗粒越大,海绿石含量越低,颗粒越小,海绿石含量越高。海绿石含量最高为粉砂岩,分布在粉砂岩中的海绿石有的层最高达50%,在粗砂岩中含量大多为1%左右。

(2)长龙山组在垂向上主要发育5个沉积单元,向上依次为后滨海滩脊、前滨、上临滨、中临滨相、下临滨相,且该区海绿石大多分布在下临滨相。

(3)柳江盆地鸡冠山地区的海绿石主要归属于低成熟-成熟的层内准原地型海绿石,并经历了一定程度风暴或潮汐流作用的搬运改造。

(4)柳江盆地鸡冠山海绿石处于弱还原的环境,其形成环境为弱水动力浅海环境,且沉积物补给慢,沉积速率缓慢。

4.2 展望

本论文通过对秦皇岛柳江盆地鸡冠山长龙山组野外露头勘探,探明了以下2点:

(1)分了该区域的沉积序列和海绿石的具体分布情况,以及海绿石在不同颗粒大小砂岩中存在的明显线性分布关系;

(2)全面地观察记录了区域内岩石的层理类型,为判断该区域的水动力条件提供依据。

将该区的样品制成岩石薄片后,用显微镜观察,判定了该区海绿石的形态特点,进一步通过扫描电镜对样品进行观察,得出了2点认识:

(1)通过观察显微镜和扫描电镜下海绿石的形状,判定了该区海绿石的形态特征和成熟状态;

(2)通过扫描电镜下海绿石晶体排列情况,结合野外露头勘探发现确定了该区在新元古代时期整体的水动力条件。

但是,由于实验条件以及掌握的资料有限,只能根据目前已经掌握的资料初步确定了该区海绿石的成熟状态和类型,还有以下3个问题需要进一步研究:

(1)对野外露头观察,需要进一步寻找该区域是否存在伴生矿物——胶磷矿、生物化石——鱼齿化石、微体化石。胶磷矿、鱼齿化石、微体化石是判定原地海绿石的标志之一,它们有可能存在于研究区内,目前尚未被发现,有待于进一步考察;

(2)由于实验条件的限制,对该区海绿石含量的确定存在一定的不准确性,有待通过X射线衍射分析或者地球化学分析数据进一步佐证;

(3)对海绿石类型的判断本论文只是根据现有资料进行了初步判断,下一步可结合海绿石K-Ar、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学方法对其进一步研究。

致谢:在野外地质考察和研究过程中得到了河北柳江盆地地质遗迹国家级自然保护区各部门的大力

协助,在此表示衷心地感谢。同时,对本论文提出重要修改意见与建议的评阅专家及编辑也表示衷心地感谢。

Acknowledgements:

This study was Supported by the “Liujiang Basin Field Geological Practice Resource Development, Integration and Management Project” of Hebei Liujiang Basin Geological Relics National Nature Reserve (No. Jilin Cao Fa [2019] No. 43).

参考文献:

- 常全明. 1992. 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, 14(2): 54-58.
- 陈瑞君. 1983. 南海北部湾海绿石的研究[J]. 地质科学, 26(3): 267-272.
- 陈淑慧, 李云, 胡作维, 李小平, 马永坤, 朱平, 陈安清. 2014. 海绿石的成因、指相作用及其年龄意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(5): 971-979.
- 大森昌卫, 茂木昭夫, 星野通平. 1980. 浅海地质学[M]. 北京: 科学出版社.
- 黄杏珍. 1982. 我国现代海绿石的特征和沉积环境及其与古代海绿石的比较[J]. 中国科学(B辑), 33(11): 1027-1040.
- 李东明, 孙镇城, 彭立才, 王敏, 王爱雷. 1996. 对“指相矿物”海绿石的重新认识[J]. 岩石矿物学杂志, 15(4): 379-384, 315.
- 李响, 蔡元峰, 胡修棉, 黄志诚, 王建刚, 耿建华. 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[J]. 地质论评, 57(1): 63-72.
- 李晓波, 偶奇, 王旖旎, 王晗, 杨明, 张梅生. 2020. 辽宁兴城地区前寒武纪地层序列和不整合——兼讨论燕山裂陷槽东南部的沉积古地理演化[J]. 沉积学报, 38(4): 687-711.
- 李增学, 李晓静, 王东东, 刘莹, 陈晓燕, 吕大炜, 张增奇, 梁吉坡, 刘海燕, 王平丽. 2016. 华北中南部地区石盒子群沉积环境研究新进展[J]. 地球学报, 37(5): 615-625.
- 林建平, 赵国春, 程捷, 曹秀华, 赵靖. 2005. 北戴河地质认识实习指导书[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘振锋, 郑桂森. 1994. 燕山地区蓟县纪~青白口纪层序地层学初探[J]. 北京地质, 6(3): 10-15.
- 曲高生. 1983. 海绿石的成因(续)[J]. 海洋地质译丛, 3(4): 71-79.
- 邵先杰, 褚庆忠, 马平华. 2017. 秦皇岛地质实习指导书[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 汤冬杰, 史晓颖, 马坚白, 史青. 2016. 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, 23(6): 219-235.
- 王俊涛, 张永生, 宋天锐. 2011. 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, 30(2):

259-266.

- 王立峰, 李文宣, 罗均林, 胡华斌. 2000. 河北省怀来新元古代长龙山组沉积相研究[J]. 世界地质, 19(2): 138-143.
- 王兴. 2018. 滨浅海砂岩储集层沉积单元成因及演化规律研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学.
- 谢启红, 邵先杰. 2016. 逆断层伴生裂缝发育特征及成因分析——以秦皇岛鸡冠山为例[J]. 科学技术与工程, 16(10): 117-121.
- 张琴, 梅啸寒, 谢寅符, 王权鑫, 李晨溪, 阳孝法, 杜会尧, 禄佳景. 2016. 不同类型海绿石的发育特征及分类体系探讨[J]. 石油与天然气地质, 37(6): 952-963.
- 张琴, 王柏寒, 周琛, 孙祖宇, 梅啸寒, 原成帅, 王凯. 2020. 北京十三陵地区青白口系长龙山组含铁建造的发育特征及成因[J]. 古地志学报, 22(3): 570-586.
- 张田, 王辰昊. 2017. 海绿石成因类型及其对沉积环境的指相分析[J]. 科技创新导报, 14(17): 84-86, 89.
- 张洲, 周敏. 2008. 河流沉积层理的水动力分析[J]. 科技情报开发与经济, 18(10): 136-137.
- 朱福明, 朱明善. 1985. 现代沉积中海绿石的分选方法及其成因问题[J]. 矿物学报, 5(1): 80-84.
- 朱政源, 董凌峰, 于航, 孙容艳. 2015. 海绿石的成因与应用[J]. 科技创新与应用, 5(33): 16-18.
- ZHU Ping, CHEN An-qing. 2014. Genesis, diagnostic role and age significance of glauconites[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 33(5): 971-979(in Chinese with English abstract).
- FISCHER H. 1990. Glauconite formation: discussion of the terms authigenic, perigenic, allogenic and meta-allogenic[J]. Eclogae Geologicae Helvetiae, 83(1): 1-6.
- HARRIS L C, WHITING B M. 2000. Sequence-stratigraphic significance of Miocene to Pliocene glauconite-rich layers, on-and offshore of the US Mid-Atlantic margin[J]. Sedimentary Geology, 134(1-2): 129-147.
- HUANG Xing-zhen. 1982. Characteristics and sedimentary environment of modern Glauconite in China and its comparison with ancient glauconite[J]. Science in China Series B, 33(11): 1027-1040(in Chinese).
- HUGGETT J M, GALE A S. 1997. Petrology and palaeoenvironmental significance of glaucony in the Eocene succession at Whitecliff Bay, Hampshire Basin, UK[J]. Journal of the Geological Society, 154(5): 897-912.
- LI Dong-ming, SUN Zhen-cheng, PENG Li-cai, WANG Min, WANG Ai-lei. 1996. Reconsideration for "face mineral" glauconite[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 15(4): 379-384, 315(in Chinese with English abstract).
- LI Xiang, CAI Yuan-feng, HU Xiu-mian, HUANG Zhi-cheng, WANG Jian-gang, GENG Jian-hua. 2011. The mineralogical characteristics of Cretaceous Albian glauconite in Zanda, southwestern Xizang(Tibet) of China and its geological implications[J]. Geological Review, 57(1): 63-72(in Chinese with English abstract).
- LI Xiao-bo, OU Qi, WANG Yi-lini, WANG Han, YANG Ming, ZHANG Mei-sheng. 2020. The Precambrian stratigraphic sequence and unconformity unconformities in Xingcheng area, of Liaoning Province, China, with discussion of the sedimentary-paleogeographic evolution of the southeastern of Yanshan taphrogenic trough Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 38(4): 687-711(in Chinese with English abstract).
- LI Zeng-xue, LI Xiao-jing, WANG Dong-dong, LIU Ying, CHEN Xiao-yan, LÜ Da-wei, ZHANG Zeng-qi, LIANG Ji-po, LIU Hai-yan, Wang Ping-li. 2016. New progress in the study of sedimentary environment of Shihezi group in central and southern region of North China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(5): 615-625(in Chinese with English abstract).
- LIU Zhen-feng, ZHENG Gui-sen. 1994. The preliminary research on the sequence stratigraphy of Jixian-Qingbaikou periods in Yanshan area[J]. Beijing Geology, 6(3): 10-15(in Chinese with English abstract).

References:

- AMOROSI A. 1995. Glaucony and sequence stratigraphy: A conceptual framework of distribution in siliciclastic sequences[J]. Journal of Sedimentary Research, 65(4b): 419-425.
- BANERJEE S, CHATTORAJ S L, SARASWATI P K, DASGUPTA S, SARKAR U, BUMBY A. 2012. The origin and maturation of lagoonal glauconites: a case study from the Oligocene Maniyara Fort Formation, western Kutch, India[J]. Geological Journal, 47(4): 357-371.
- BANERJEE S, BANSAL U, PANDE K, MEENA S S. 2016. Compositional variability of glauconites within the Upper Cretaceous Karai Shale Formation, Cauvery Basin, India: Implications for evaluation of stratigraphic condensation[J]. Sedimentary Geology, 331: 12-29.
- CHANG Quan-ming. 1992. Research on the concentration features and the sedimental context of glauconite in Shimenzhai area, Qinhuangdao[J]. Journal of Tangshan Institute of Technology, 14(2): 54-58(in Chinese with English abstract).
- CHEN Rui-jun. 1983. Study of glauconites from Beibu Bay of the South China Sea[J]. Chinese Journal of Geology, 26(3): 267-272(in Chinese with English abstract).
- CHEN Shu-hui, LI Yun, HU Zuo-wei, LI Xiao-ping, MA Yong-kun,

- LIN Jian-ping, ZHAO Guo-chun, CHENG Jie, CAO Xiu-hua, ZHAO Jing. 2005. Beidaihe geological cognition practice guide[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ODIN G S, FULLAGAR P D. 1988. Geological significance of the glaucony facies[J]. *Developments in Sedimentology*, 45: 295-332.
- ODIN G S, MATTER A. 1981. De glauconarium origine[J]. *Sedimentology*, 28(5): 611-641.
- QU Gao-sheng. 1983. Genesis of glauconite (Continued)[J]. *Marine Geology Translation Cluster*, 3(4): 71-79(in Chinese).
- SHAO Xian-jie, CHU Qing-zhong, MA Ping-hua. 2017. Qinhuangdao Geological Practice Guide[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- TAKAMORI Chang-wei, Masahide Omori Akio Motegi, Tohei Hoshino. 1980. Shallow water geology[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- TANG Dong-jie, SHI Xiao-ying, MA Jian-bai, SHI Qing. 2016. Mesoproterozoic glaucony as a potential mineral proxy for shallow chemocline in the Precambrian ocean[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 219-235(in Chinese with English abstract).
- WANG Jun-tao, ZHANG Yong-sheng, SONG Tian-rui. 2011. Characteristics and sedimentary environment of authigenic glauconite from limestone of the Amushan Formation in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(2): 259-266(in Chinese with English abstract).
- WANG Li-feng, LI Wen-xuan, LUO Jun-lin, HU Hua-bin. 2000. The study on sedimentary facies of Changlongshan formation of Neoproterozoic era in Huailai, Hebei[J]. *World Geology*, 19(2): 138-143(in Chinese with English abstract).
- WANG Xing. 2018. Study on the origin and evolution of sedimentation unit in shallow sand rock reservoir[D]. Qinhuangdao: Yanshan University(in Chinese with English abstract).
- XIE Qi-hong, SHAO Xian-jie. 2016. Accompanying fracture characteristics and formation mechanism of the reverse fault: Taking Qinhuangdao Jiguan mountain as an example[J]. *Science Technology and Engineering*, 16(10): 117-121(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Qin, MEI Xiao-han, XIE Yin-fu, WANG Quan-xin, LI Chen-xi, YANG Xiao-fa, DU Hui-yao, LU Jia-jing. 2016. Characteristics of different types of glauconite and their classification systems[J]. *Oil & Gas Geology*, 37(6): 952-963(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Qin, WANG Bo-han, ZHOU Chen, SUN Zu-yu, MEI Xiao-han, YUAN Cheng-shuai, WANG Kai. 2020. Characteristics and genesis of iron formation in the Changlongshan Formation of Qingbaikou System in the Ming Tombs area, Beijing[J]. *Journal of Palaeogeography*, 22(3): 570-586(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Tian, WANG Chen-hao. 2017. The genetic types of glauconite and the relationship analysis of facies and sedimentary environment[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 14(17): 84-86, 89(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhou, ZHOU Min. 2008. Hydrodynamic analysis on fluvial sedimentary structure[J]. *Sci-Tech Information Development and Economy*, 18(10): 136-137(in Chinese with English abstract).
- ZHU Fu-ming, ZHU Ming-shan. 1985. The separation of glauconite in modern sediments and the problem of its genesis[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 5(1): 80-84(in Chinese with English abstract).
- ZHU Zheng-yuan, DONG Ling-feng, YU Hang, SUN Rong-yan. 2015. Causes and application of glauconite [J]. *Scientific and Technological Innovation and Application*, 5(33): 16-18(in Chinese).