

# 胜利油田下第三系砂岩中阶状石榴石的自生成因及形成温度

周自立

(胜利油田地质科学研究所)

**内容提要** 本文应用扫描电子显微镜及偏光显微镜,研究重矿物阶状石榴石表面的显微结构,确定它是自生成因的铁铝石榴石。根据阶状石榴石在各探井剖面中的纵向分布规律及特征变化,可以推断它的形成与埋藏深度或地温关系密切。通过计算确定,阶状石榴石初始形成的温度为 $92 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,可作为成岩矿物地温计。这对评价新探区的生油岩及储集岩均有实际意义。

**主题词** 阶状石榴石 矿物地温计 下第三系砂岩 胜利油田 深埋藏成岩期

**作者简介** 周自立 男 56岁 高级工程师 沉积岩石学

## 引言

胜利油田的主要储集岩——下第三系碎屑岩的重矿物组分中,可见表面具有阶梯状显微结构的石榴石,简称阶状石榴石。前人曾将石榴石的这种表面结构称为叠瓦状或刻面(facets),结构清晰美观(图版I, 1—5),引人注目。六十年代,在胜利油田勘探初期,曾有人试图用阶状石榴石划分、对比地层,做了大量重矿物分析鉴定,但没有取得成效,主要原因在于对它的成因缺乏认识。

有关阶状石榴石的成因,已有30多年的研究历史,众说纷纭,只在次生成因这一点上认识基本一致。研究早期,有少数学者曾提出是自生成因的,由于依据太少,未引起重视;而大部分学者认为是溶蚀形成的<sup>[1]</sup>。近年来,虽然应用扫描电镜进行研究,但多数学者仍坚信是层内溶解或蚀刻作用(etching)形成的<sup>[2][3]</sup>。

笔者在光学显微镜下对大量重砂样品进行研究的基础上,应用扫描电镜及能谱分析等手段,确定阶状石榴石是深埋藏成岩期的自生矿物;又根据66口井重矿物分析资料的研究,业已查明阶状石榴石的形成,主要取决于地温。根据计算确定,阶状石榴石开始形成的温度为 $92 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,可作为一个良好的矿物地温计。这一认识,不仅具有一定的理论意义,而且对生油层及储层评价有实际意义。

## 一、阶状石榴石产出的地层及岩性特征

胜利油田位于黄河口附近的济阳拗陷,其地质背景有利于研究埋藏成岩作用。该区

在新生代时期为持续下沉的断陷拗陷盆地，形成巨厚的碎屑沉积物，总厚度在7000m以上。主要岩性为砂岩、粉砂岩及泥岩互层。从早第三纪始新世到第四纪，地层发育完全，没有大的沉积间断，埋藏历史简单。

阶状石榴石出现的最高层位为下第三系渐新统沙河街组第二段，如渤92井的2441.6m；但在其下伏地层分布较为普遍。这套地层属陆相，内含河流相、三角洲相、湖相及浊积相砂体。

不同地区不同剖面中，阶状石榴石开始出现的深度变化较大，最浅为滨16井的1465.24m，属始新统；最深为义13井的2724m，属渐新统沙三段。

含有阶状石榴石的碎屑岩，以长石质砂岩及粗粉砂岩为主，其主要陆源轻矿物组分的种类及含量，与上覆地层基本相同，石英50—60%，长石30—40%，岩屑10—20%，重矿物组分差别较大。

含阶状石榴石的重砂，石榴石含量高，一般占30—50%，以无色者为主，有色的和富含包裹体的石榴石相对较少。伴生的重矿物以锆石及电气石等稳定矿物为主，一般含量为20—30%。

不含阶状石榴石的上覆层，随深度变浅，石榴石及稳定矿物锆石和电气石含量逐渐减少，而不稳定矿物绿帘石含量渐增，最高可达50%以上。所见的石榴石类型较多，有无色、浅红色、红色、褐色及黄色，表明其成分不同。

## 二、阶状石榴石的成因特征

据已有报道，阶状石榴石多见于中生界和古生界碎屑岩中，而第三系碎屑岩中的阶状石榴石则较少见。现代沉积中可有再沉积的阶状石榴石，但易与原生的阶状石榴石区别。

在普通偏光镜下观察，大部分阶状石榴石为无色，无包裹体，透明度好，即使在最高倍镜下，也难看清其表面显微结构的细节，也就不可能提出令人信服的成因依据。由于扫描电镜的广泛应用，为阶状石榴石的成因研究，提供了有利的手段。

为了查明阶状石榴石的成因，笔者在偏光镜下研究大量重砂样品的基础上，选出不同深度、不同发育程度的阶状石榴石，在扫描电镜下仔细观察其表面结构，同时用能谱分析仪逐一确定其化学成分。此外，还与相邻层位的碎屑斜长石及重矿物绿帘石的天然溶蚀表面特征进行对比。所有资料表明，阶状石榴石是自生成因的，主要依据如下：

1. 在高倍扫描电镜下观察，阶状石榴石表面的特点不同，有的由八面体晶面组成（图版 I，1、2），有的由菱形晶面组成（图版 I，3—5），有的阶状晶面具有直二面角（图版 II，1—2）。所有的晶面极为规则，面平、棱直、角尖，大小一致，具有定向性，似受原颗粒固有的一定结晶方向所控制。表面上一般无孔，偶见小孔，也是由自形晶面搭接而成。这类显微结构特点，是自生成因的重要依据。又根据其表面没有任何磨蚀痕迹，所以，也不可能是再沉积的。

2. 阶状石榴石具有一定的化学成分。经能谱分析，所有阶状石榴石的化学成分简单，均以硅、铝、铁为主，可含微量镁，没有其他元素（图版 I，6），应为铁铝石榴

石 ( $\text{Fe}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$ )。成分单一的特征,也表明是自生成因的,而不可能是溶蚀成因,溶蚀作用不可能改变各种石榴石的化学成分,使其单一化。

3.在偏光镜下,阶状石榴石与碎屑石榴石之间,有许多差别。前者一般为无色,偶见有带粉红色者,无矿物和其他杂质作为包裹体。透明度好。而陆源碎屑石榴石,则具有多种颜色,富含包裹体,透明度较差。

4.阶状石榴石表面,无任何溶蚀特征。在阶状石榴石分布井段内或其上下地层,可见经受层内溶解的斜长石(图版Ⅱ,3)和重矿物绿帘石(图版Ⅱ,4),表面的溶蚀特征十分明显,多见大小不等,形态不规则的溶孔,可出现齿状边缘或港湾状溶蚀边缘。有的绿帘石具有溶蚀形成的似阶状表面特征(图版Ⅱ,5—6),但其阶面棱角圆化,分布不均匀,形态不规则,并有溶孔及溶蚀边缘,显然不同于阶状石榴石的表面特征。

### 三、阶状石榴石的形成与地温有关

自生阶状石榴石的形成,取决于多种因素,如温度、压力、间隙流体的性质、沉积物成分等,但温度是最关键的因素。这一认识的主要依据是:

1.阶状石榴石的纵向分布及特征变化,均与埋深关系密切。根据66口井重矿物资料的统计,始新统砂岩中阶状石榴石的最浅出现深度为滨16井的1465.42m,渐新统砂岩中阶状石榴石出现的最浅深度为2131.7m(胜坨油田的3—5—11井)。从阶状石榴石

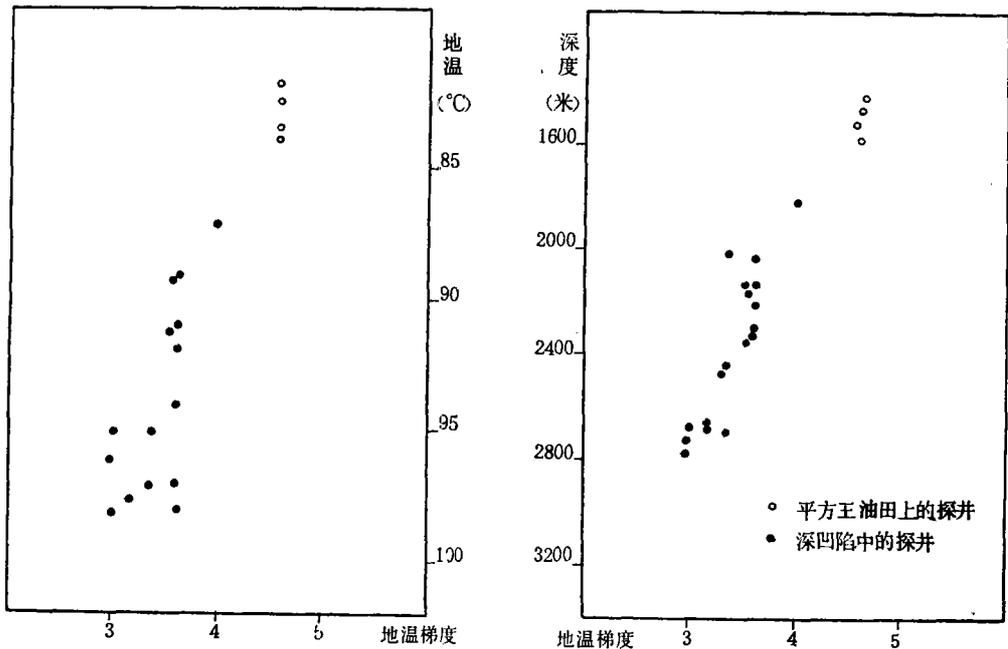


图1 地温梯度对各井阶状石榴石形成的影响

Fig. 1 Effect of thermal gradient on the formation of step-like garnets in each well

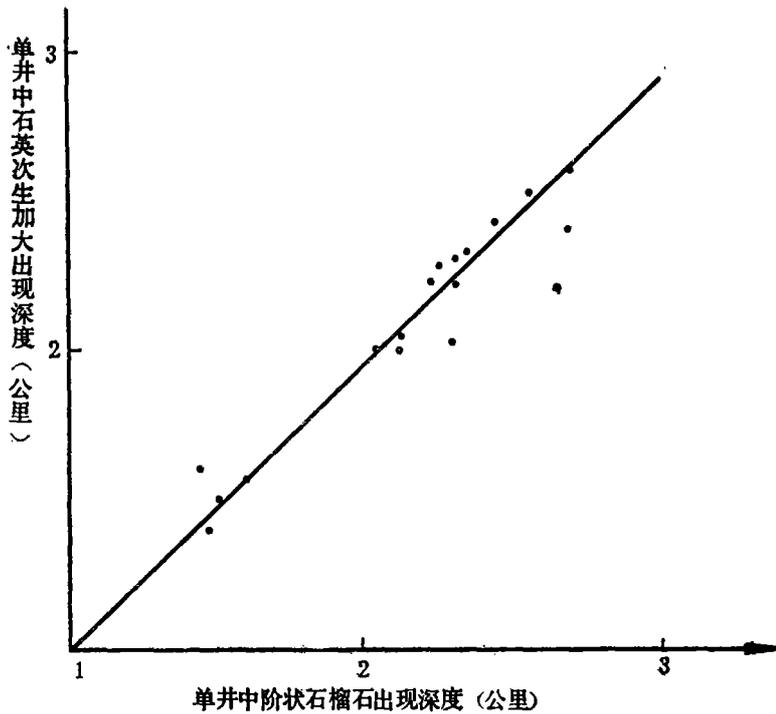


图2 各探井中阶状石榴石和石英次生加大出现深度的相关图  
 Fig.2 Relation of the first occurrence depth between quartz overgrowth and step-like garnet in each well

开始出现深度向下，不仅自生阶状石榴石的数量增多，而且晶面的发育程度增强，包裹颗粒的面积增大，自形晶面形态趋于多样化。

2.根据22口探井重矿物分析资料统计，阶状石榴石开始出现的深度，受地温梯度影响(图1)。高地温梯度区(如平方王油田)的四口探井，阶状石榴石开始出现的深度浅，而一般地温梯度区阶状石榴石开始出现的深度较大，这间接说明阶状石榴石的形成是与地温关系密切。

3.各探井中阶状石榴石的出现深度与强石英次生加大出现的深度为明显的正相关，关系直线的斜率为0.97，很接近于1(图2)。

关于石英次生加大(增生)的形成温度，近年来有些学者应用氧同位素资料或液态包裹体测温资料，确定为80—94℃[4][5]。因此，阶状石榴石也应当是在大于一定地温的条件下形成的，它可作为矿物地温计。

#### 四、阶状石榴石形成温度的确定

研究区在新生代时期持续下沉，有利于研究埋藏成岩作用以及成岩矿物形成与地温的关系。该区在石油勘探过程中，根据594口井高压物性温度资料所换算的地温梯度值

编绘出济阳拗陷地温梯度变化图。根据所标出的各井的地温梯度值, 可以计算任一深度的地温( $T$ )。计算公式为:  $T = G(H - h) + 14.5$ 式中 $G$ 为地温梯度(取100m深度范围的温度递增率),  $H$ 为深度,  $h$ 为恒温层深度(本区该值很小, 计算时未考虑, 取 $h = 0$ ), 14.5为本区地面平均温度。因此, 计算公式可简化为:  $T = G \times H + 14.5$ 。

根据已有资料的研究, 已经查明在第三系地层中有些矿物的形成和溶解与埋深关系密切, 即主要取决于地温。这类矿物有作为砂岩胶结物的自生高岭石, 石英次生加大(增生)和晚期形成的含铁碳酸盐矿物; 有出现于重矿物中的绿帘石的溶解和自生阶状石榴石的形成; 有泥质岩中蒙脱石向伊利石的转化。其中有些成岩矿物的形成温度已有测定值。笔者以东营凹陷为重点研究区, 分别计算各种成岩矿物开始出现深度的相应地温, 并与测定值<sup>[6]</sup>对比, 符合性较好(表1), 最大差值为7.5℃, 一般小于5℃。由此表明, 在研究区的深凹陷中, 目前新生代岩石所处的温度, 接近于其所经历的最高温度, 即今地温接近于最高古地温。因此, 各探井中阶状石榴石开始出现深度的相应地温, 就是其开始形成所需的温度(表2)。

表1 矿物地热温度计的确定依据

Table 1 Determination evidence of the mineral geothermometer

埋藏成岩矿物	自生高岭石	弱石英加大	强石英加大	阶状石榴石	晚期碳酸盐矿物	绿帘石的溶解	蒙脱石向伊利石转化
资料代表井的井号	营12-检48 营8-5井	2-2-检1502	3-4-13	3-4-13	3-5-11	2-检3-14	2-下2观18
代表井的地温梯度(℃/100m)	3.4	3.4	3.6	3.6	3.6	3.4	3.4
出现层位	沙一段顶	沙二段顶	沙三段顶	沙三段上部	沙三段上部	沙一段顶	东二段
最高出现深度(m)	1720	1705	2018	2132	2171	1753~1998	1450
计算的形成地温℃	72.9	72.2	88.2	91.0	92.5	74.1	63.8
文献资料	测定的形成温度	≥70℃	≥68℃	≥94℃		>100℃	60℃
	研究者	Franks	Hazeldine	Hazeldine		Franks	Hoffman 及Hower
	发表时间	1984年	1984	1984		1984	1979
计算和测定温度差值℃	+2.9	+4.2	-5.8		-7.5		+3.8

根据表2所列的资料来看, 除平方王油田(属隆起带)的四口井外, 凹陷区13口探井阶状石榴石开始形成温度的变化范围在87—96.4℃。变化幅度接近10℃, 因此, 可将阶状石榴石的开始形成温度表示为 $92 \pm 5$ ℃, 略高于强石英次生加大的形成温度。

研究区第三系碎屑岩埋藏成岩作用的研究表明, 在阶状石榴石形成的同时, 伴有泥岩中蒙脱石向伊利石的转化作用及碎屑岩中长石的溶解作用等, 均可为形成阶状铁铝石榴石提供Fe、Si、Mg、Al的来源<sup>[7]</sup>。

研究碎屑岩中阶状石榴石的成因及形成温度对石油勘探具有重要意义。

阶状石榴石开始形成的温度, 可用以评价生油层。根据东营凹陷大量的有机地球化

表2 强石英加大及阶状石榴石开始形成的地温(℃)  
Table 2 Initial formation temperature of quartz overgrowth  
and step-like garnet

井号	岩矿分析		最高出现深度(米)		地温梯度 ℃/100m	阶状石榴石 的形成温度	石英加大的 形成温度
	井段(m)	数量	石英加大	阶状石榴石			
滨52井	1449~1646.39	90	1468.78	1478.72	4.6	82.5	82.1
滨16井	1055~1641.20	215	1490.8	1465.24	4.6	81.9	83.1
滨1井	1455~1720	55	1509.6	1507.5	4.6	83.8	83.9
滨14井	1531~1687	36	1582.2	1603	4.6	88.2	87.3
滨10井	2302~2775	44	2024	2302	3.6	97.3	87.4
纯11井	2217~2322	106	2227	2229	3.6	94.7	94.6
通9井	1052.5~1996.5	47		1813.5	4.0	87.0	
通5井	1884~3060	207	2308.5	2327.7	3.4	92.6	93.3
纯17井	2250.07~2383.07	58	2253.72	2364.35	3.4	94.9	91.1
通7井	1722~2635	75		2151	3.6	91.9	
永1井	1689.5~2230.31	33		2030.5	3.4	87.6	
3-5-11井	1850~2382.8	339	2278.2	2131.7	3.6	91.2	96.2
3-4-13井	1863.85~2263.24	264	2048	2133	3.6	91.3	88.2
垦9井	2424~2690	32	2633	2662	3.0	94.0	93.2
义11井	2720~3024	49	2722		3.0		96.1
渤92井	2392~2881	80	2492	2441.6	3.3	96.4	95.0
义13井	2291.5~2820.5	14		2724	3.0	96.2	
义9井	2681~3157.6	30	2681	2681	3.0	94.9	64.9

学资料表明,生油门限深度为2200m,相应的生油门限温度为93℃,与阶状石榴石开始出现的深度和相应的地温很近似。因此,可以应用重矿物分析资料中阶状石榴石开始出现的深度和相应的地温,计算地温梯度并确定生油门限深度。这对评价新探区的生油岩是有意义的。

阶状石榴石的分布,对储层评价也是有意义的。含阶状石榴石的碎屑岩储层,一般石英次生加大较强,晚期碳酸盐胶结物含量较高,岩石物性变差,固结程度高,油层结构好,酸化压裂效果明显。对这类储层,还应重视寻找和研究在深层由有机酸溶解形成的次生孔隙〔8〕。

本文初稿经成都地质学院曾允孚教授和夏文杰副教授审阅。此外,在工作中还得到我院电镜组的帮助,谨此致谢。

收稿日期 1986年1月18日

## 参 考 文 献

- [1] Pystawalov, L. B., 1956, Secondary change of sedimentary rocks and their significance. *Tr. Geol. Akad. Nauk SSSR*, 19—22.
- [2] Rahmani, R.A., 1973, Grain surface etching feature of some heavy minerals. *J. Sediment. Petrol.* V. 43, 882—888.
- [3] Morton, A.C., 1984, Stability of detrital heavy minerals in Tertiary sandstones from the North Sea Basin. *Clay Minerals*, V.19, 287—308.
- [4] Franks, S. G., 1984, Relationships among carbon dioxide, pore-fluid chemistry, and secondary porosity, Texas Gulf Coast (abs.). *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.* V.68, 478.
- [5] Hazeldine, R.S., 1984, Quartz diagenesis and convective fluid movement, Beatrice Oilfield, UK, North Sea. *Clay Minerals*, V. 19, 391—402.
- [6] Hoffman, J. and Hower, J., 1979, Clay mineral assemblies as low grade metamorphic geothermometers; Application to the thrustfaulted disturbed Belt of Montana U.S.A., *SEPM, Special Publication*, V. 26, 35—79.
- [7] Hower, J., Eslinger, E. V., Hower, M. E. and Perry, E. A., 1976, Mechanism of argillaceous sediments; Mineralogical and chemical evidence. *Bull. Geol. Soc. Amer.* 87, 725—737.
- [8] Surdam, R. C. 1984, Mineral oxidants and porosity enhancement. *Bull. Amer. Assoc. Pet. Geol.* V.68, p. 523.

## AUTHIGENIC ORIGIN AND FORMATION TEMPERATURE OF STEP-LIKE GARNET FROM LOWER TERTIARY SANDSTONE, SHENGLI OIL FIELD, SHANDONG

Zhou Zili

(Geological Research Institute of the Shengli oil Field)

### Abstract

Step-like garnets, i.e. garnets with faceted surface, occur in heavy minerals from the reservoir rocks of Lower Tertiary sandstones. Many people suggested that it resulted from dissolution or chemical etching, but many evidences show that this is not true in the study area. The writer suggests that it is an authigenic mineral and can be used as an excellent mineral geothermometer.

Studies by means of SEM show that the surface microtexture of the step-like

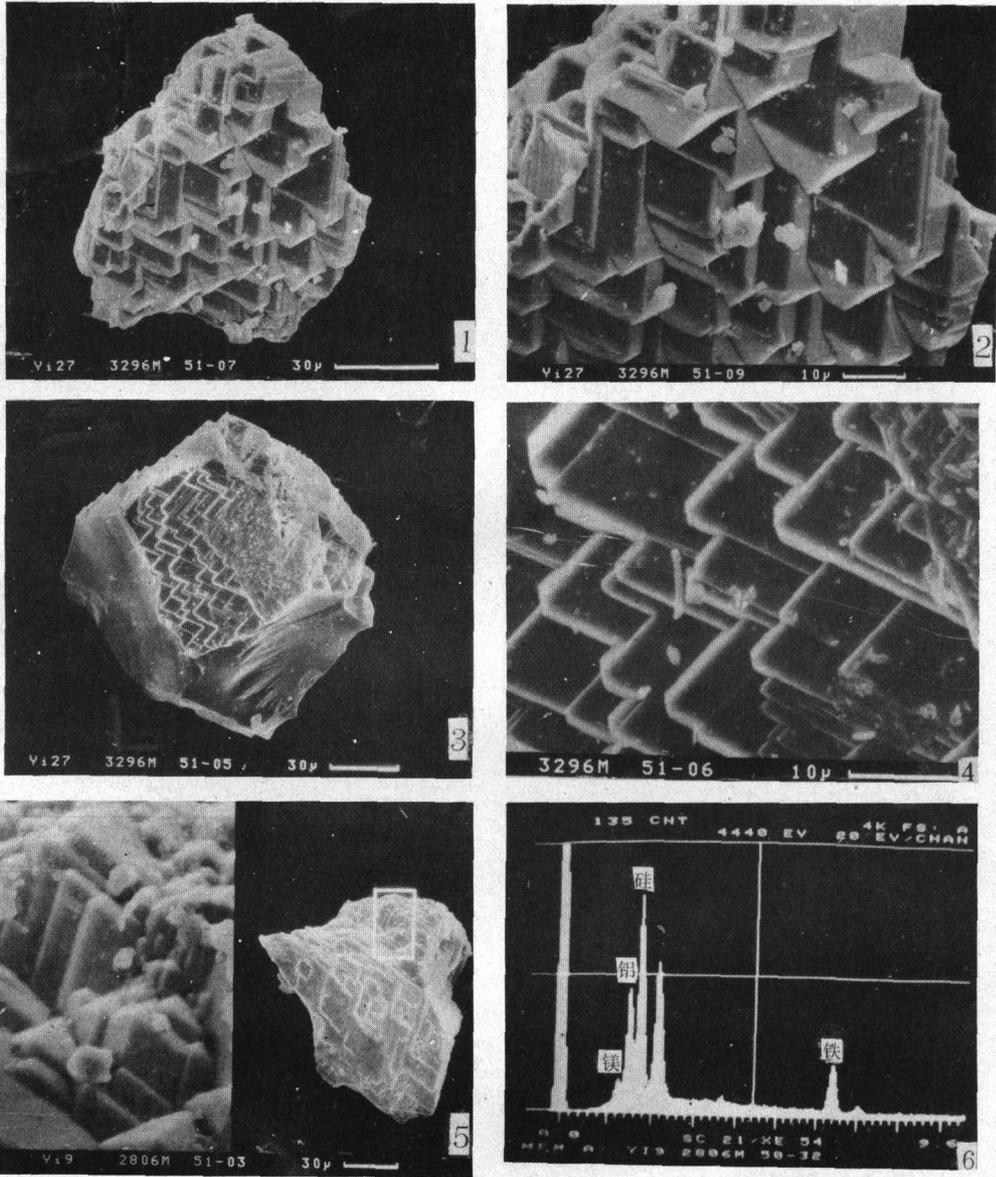
garnets consisted of euhedral crystal faces are very regular and well defined, no evidence of dissolution or chemical etching can be found. The chemical compositions are analyzed by energy dispersive analyser, which indicates that all of the authigenic garnets have certain chemical compositions similar to those of almandine.

The authigenic garnet is an excellent mineral geothermometer, its distribution is closely related to its burial depth and the geothermal gradient. It is found in Oligocene sandstones at depth more than 2100m, the amount of the step-like garnets increases with the increase of burial depth, the size of its crystal faces becomes larger and the shape tends to more complex and more variable.

The studied area was a downfaulted basin with continuous subsidence during Cenozoic Period and favours to study the burial diagenetic minerals. In comparison of the calculated temperature corresponding to depths of various burial diagenetic minerals with the measured temperature of these minerals in studied area, it is suggested that the calculated temperature is approximate or equal to the temperature limit of these mineral formation. According to the calculation results of the data from 13 wells, it is demonstrated that the step-like garnets are formed at  $92 \pm 5^\circ\text{C}$ , which approximates to the threshold temperature ( $93^\circ\text{C}$ ) of the oil generation in Dongying Basin. It is important for the evolution of source rocks and reservoir rocks in a new exploration area.

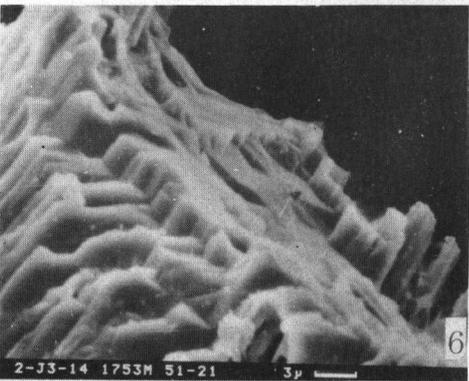
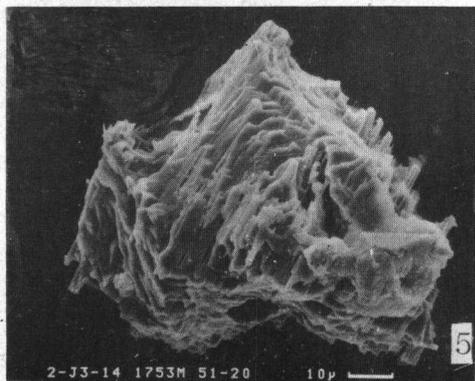
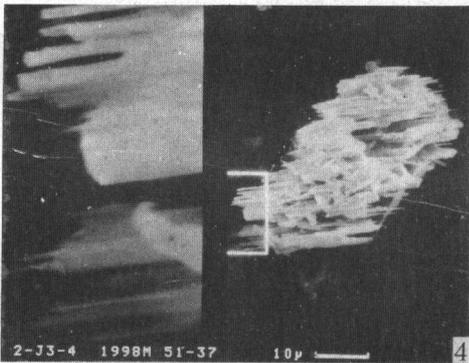
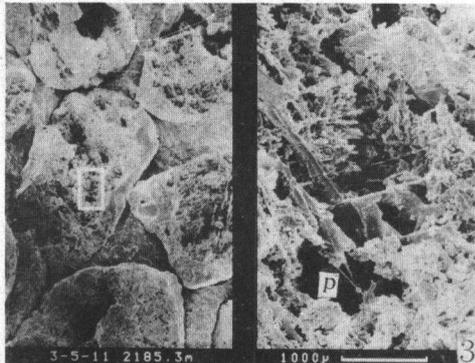
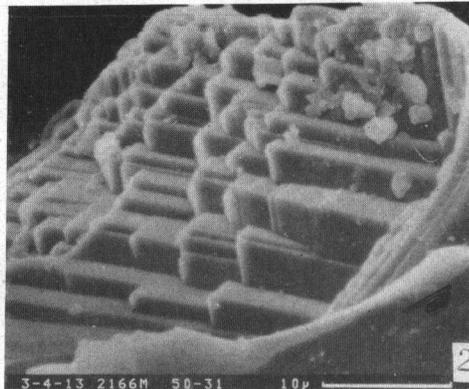
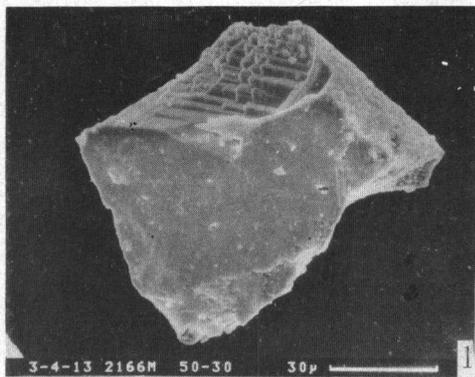
Detailed investigations of more deeply-buried sediments have shown that several kinds of burial diagenesis involving the almandine formation or precipitation can contemporaneously occur, such as the conversion of the smectite to illite in mudstone and the dissolution of the feldspar in sandstone. The conversion of smectite to illite involves the release of a considerable number of components including Fe, Mg, Si, all of which are required for the almandine formation.

周自立: 山东胜利油田下第三系砂岩中阶状石榴石的自生成因及形成温度 图版 I  
 Zhou Zili AUTHIGENIC ORIGIN, FORMATION TEMPERATURE, STEP-LIRE GARNET



1—5. 为阶状石榴石表面显微结构的扫描电镜 (SEM) 照片 1. 1. 表面由全自形的八面体晶面构成, 呈尖鳞状。义 27 井, 沙三段 2. 为 1 的局部放大。晶面极为规则, 面平、棱直、角尖 3. 顶面由许多自形菱形晶面构成, 侧面显贝壳状断口, 义 27 井, 沙三段 4. 为 3 的局部放大, 晶面形态规则, 呈阶梯状 5. 左侧为局部分屏, 放大 6 倍。顶面由大小不等的两面菱形面构成, 义 9 井, 沙三段 6. 为 5 中阶状石榴石的能谱分析结果, 主要化学成分为硅、铝、铁, 并含微量镁。未标明的峰为镀膜金峰。

周自立: 山东胜利油田下第三系砂岩中阶状石榴石的自生成因及形成温度 图版 II  
 Zhou Zili AUTHIGENIC ORIGIN, FORMATION TEMPERATURE. STEP-LIRE GARNET



均为矿物的扫描电镜照片 1. 石榴石的一个贝壳状断口面上呈现阶梯状表面结构 3-4-13井, 沙三段上部  
 2. 为1的局部放大, 见有直二面角。二面角棱直且定向性清楚 3. 砂岩中陆源碎屑斜长石的层内溶蚀表面特征, 右侧分屏放大大部分见有许多不规则溶孔(P), 无阶状表面结构。3-5-11井, 沙三段上部 4. 重矿物绿帘的溶蚀表面特征, 具有齿状边缘和溶孔。2-检<sub>3</sub>-4井, 沙二段 5. 绿帘石的溶蚀表面特征, 具有齿状边缘。2-检<sub>3</sub>-14井, 沙一段上部 6. 为5的局部放大, 见有溶蚀形成的阶状表面, 阶面分布不均且不规则, 二面角棱不清楚, 阶面不平。具有齿状边缘。