

夕线石成因讨论

任留东

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 本文通过夕线石的结构、成分及产出状态, 系统讨论和总结了其变质形成过程。含夕线石的变质岩原岩未必对应泥质岩, 富夕线石岩石成分上更不能与任何的泥质岩成分对应。原岩本身富铝如多数泥质岩是形成夕线石非常有利的成分条件, 但是, 即使有合适的温压条件, 也未必能够形成夕线石, 组分的差异性迁移才是夕线石形成的必要条件。夕线石的形成与变形、变质作用, 尤其是深熔作用密切相关。浅色体、伟晶岩及花岗岩等均可通过变质、深熔作用演化而成。夕线石形成的关键是深熔作用中碱(土)金属的迁移、淋滤及其与硅铝组分的分离, 从而造成局部 Al_2O_3 相对增加。夕线石尤其是毛发状夕线石对应于早期差异性变形-变质作用阶段。组分迁移过程中溶液或熔体组分的流动导致夕线石出现“应力定向”的假象, 夕线石和相关矿物的聚集以及不同变质矿物的多个演化阶段。铝硅酸盐 Al_2SiO_5 的不同变体虽然成分相同, 其所产出的岩石类型或环境仍有显著的差别, 其形成不仅受温压条件控制, 流体或熔体的酸碱性质也很重要, 介质成分可影响到铝的配位。

关键词: 夕线石; 深熔作用; 浅色体; 组分迁移、富集; 介质

中图分类号: P578.94⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)02-0437-09

Discussion on the origin of sillimanite

REN Liu-dong

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Through the structure, composition and occurrence of sillimanite, the formation process of sillimanite has been discussed and summarized in this paper. In composition, the protolith of the sillimanite-bearing metamorphic rocks is not necessarily pelite rocks, the sillimanite-rich rocks does not necessarily correspond to any pelite rocks. The Al-rich feature of the pelite is favorable for occurrence of sillimanite, but sillimanite may not occur in the rock even under appropriate metamorphic temperature and pressure condition. The differential migration of components is essential for sillimanite. The formation of sillimanite is closely related to deformation and metamorphism, especially anatexis in metamorphic rocks. Leucosome, pegmatite and granite all can evolve through metamorphism and anatexis. The key to the formation of sillimanite is the migration and leaching of alkaline(-earth) metals and their separation from sil components, resulting in the relative enrichment of Al_2O_3 . Sillimanite, especially fibrolite, corresponds to the early differential deformation-metamorphism stage. In the process of component migration, the flow of solution or melt components leads to the false image of “stress orientation” of sillimanite, the aggregation of sillimanite and related minerals, and multiple evolution stages of different metamorphic minerals. Although different variants of Al_2SiO_5 have the same composition, their rock types or environments are still significantly different. On the one hand, their formation is not only controlled by temperature and pressure conditions, but also the acidity or alkalinity of the fluid or melt, which is critical in affecting the coordination state of aluminum.

收稿日期: 2021-11-19; 接受日期: 2022-02-10; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(41941004, 41472172)

作者简介: 任留东(1965-), 男, 博士, 研究员, 从事变质地质和南极地质研究工作, E-mail: ldren@cags.ac.cn。

Key words: sillimanite; anatexis; leucosome; component migration and enrichment; media

Fund support: National Natural Science Foundation of China(41941004, 41472172)

夕线石(sillimanite), 是以美国耶鲁大学化学和地质学教授 Benjamin Silliman (1779~1864) 的名字命名的一种矿物, 是 Al_2SiO_5 铝硅酸盐多变体(夕线石、蓝晶石和红柱石)的一种, 具有 $\text{Al}^{\text{VI}}[\text{Al}^{\text{IV}}\text{SiO}_4]\text{O}$ 的分子结构, 其中的 Al 具有 4、6 配位, Al^{VI} 可被少量 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、Ti 替换, Si 可被少量挥发分 B 替换(Grew and Hinthore, 1983)。从原子结构及电价情况看, B 更有可能对 Al^{IV} 进行替换。

夕线石基本上是一种变质矿物, 可产于如变质岩的长英质岩石中(图 1), 特别是经历过中高级变形变质造成的裂隙发育和流体活动的岩石(图 1a), 其产出通常与混合岩、伟晶岩(任留东等, 2016)及花岗岩(任留东等, 2012)密切相关(图 1b、1c)。环斑花岗岩内钾长石外壳的斜长石之中亦可产出夕线石(葛文春等, 1991)。在变质矿物组合演

化中, 夕线石的出现往往较早, 紧随其后的是石榴子石、长石(尤其是斜长石)和堇青石等。

夕线石多见于长英质变质岩中, 产状显得较为单一, 但其实际形成过程多种多样、十分复杂。本文尝试从与夕线石相伴的矿物组合、夕线石产出的岩石类型、岩石的产状(结构、构造特征)、夕线石形成涉及到的组分和可能的流体类型等方面来综合讨论夕线石的成因机制。

1 夕线石形成的岩石成分因素

一般认为, 含夕线石尤其富含夕线石的片(麻)岩的原岩是泥质岩或粘土岩等富铝沉积岩, 沉积于稳定的(被动)大陆边缘或盆地环境(王仁民等, 1987)。通过详细的野外观察、室内显微结构及岩石

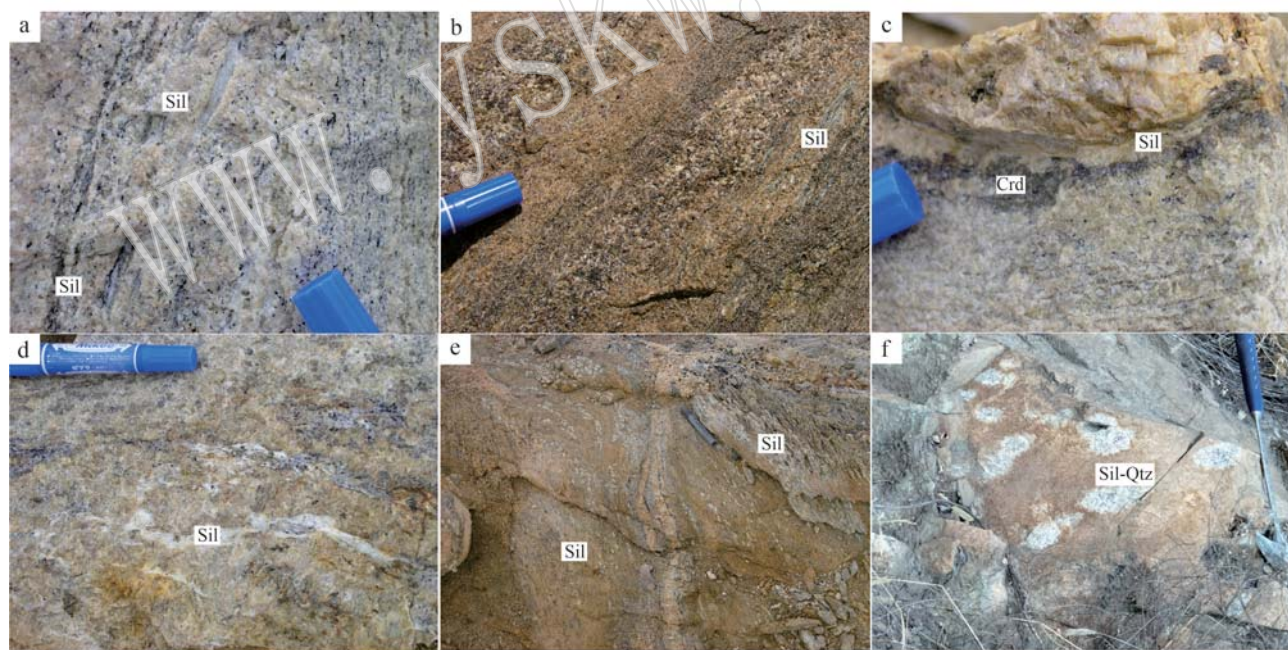


图 1 夕线石的一些野外产出状态

Fig. 1 Occurrences of sillimanite on the outcrops

a—伟晶质浅色体及其中的夕线石(东南极拉斯曼丘陵); b—夕线石片麻岩与伟晶质条带相间分布(东南极拉斯曼丘陵); c—伟晶脉边缘的夕线石, 附近为堇青石(东南极拉斯曼丘陵); d—浅色体中夕线石密集条带(东南极拉斯曼丘陵); e—密集分布的扁豆状夕线石集合体, 中间为伟晶岩脉(东南极 Vogoy 岛); f—夕线石-石英球(聚集体)(阜平杂岩); Bt—黑云母; Crd—堇青石; Qtz—石英; Sil—夕线石
a—pegmatitic leucosome and internal sillimanite(Larsemann Hills, East Antarctica); b—alternating arrangement of sillimanite gneiss and pegmatite band(Larsemann Hills, East Antarctica); c—pegmatite and rim sillimanite, with nearby cordierite(Larsemann Hills, East Antarctica); d—sillimanite band within leucosome(Larsemann Hills, East Antarctica); e—bean-like sillimanite aggregate, with narrow pegmatite(Vogoy Island, East Antarctica); f—nodule of sillimanite-quartz(Fuping Complex, North China Craton); Bt—biotite; Crd—cordierite; Qtz—quartz; Sil—sillimanite

成分分析,任留东等(2007)提出,南极拉斯曼丘陵及其邻区的(含)夕线片麻岩类的原岩可以是粘土岩或页岩、泥质岩,也可以是杂砂岩、亚杂砂岩、石英砂岩等。含夕线石的岩石未必对应泥质岩,富夕线石岩石成分上更不能与任何的泥质岩成分对应。夕线石的形成与变形、变质作用尤其是深熔作用密切相关,关键是伴随 Al_2O_3 相对增加的过程,形成夕线石的部位属于局部开放体系。

在中高级长英质变质岩中,夕线石常与钛铁氧化物相伴生(任留东,2021),反映它们的形成机制应是相似的,因此可通过相伴生的钛铁氧化物的特征探讨夕线石的形成过程。南极拉斯曼丘陵长英质岩系中大量夕线石和铁钛氧化物类矿物组合的形成,反映了变形作用的非均匀性及相伴随的组分分异作用(任留东等,2007;任留东,2021)。深熔作用中,伴随(准)熔体的出现,体系中组分的萃取、分异效果较为明显,可出现截然不同的二相或多相分异结构,形成类似(准)熔体的活跃组分相和固相残留相(组成可以不固定),并且深熔作用中惰性组分发生滞留和富集,并非是原岩富集这些组分(任留东,2021)。固相残留体中富铝、铁组分形成夕线石和铁钛氧化物团块,其它特征矿物如石榴子石、堇青石、尖晶石的形成,按封闭、平衡体系的解释,代表了石榴子石减压分解形成堇青石、尖晶石的反应(Fitzsimons, 1996)。通过上面的分析,认为夕线石的形成应与深熔过程中的组分分异作用有关,而不是简单的降压分解产物,只是因为组分迁移范围有限,变质反应仅能局部平衡而难以达成体系平衡,从而保存了其他伴生矿物这些各组分分异阶段的产物。夕线石的形成过程中可发生 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 和 Ti^{4+} 对 Al 的成分替换(任留东等,2008; Wang *et al.*, 2020),甚至挥发分 B 对 Si 的替换(Grew and Hinthore, 1983),说明在夕线石形成过程中,介质中兼有惰性组分和挥发性组分存在。任留东等(2021)进一步指出,深熔作用中的挥发分亦可局部富集。挥发分不饱和状态下的深熔作用局部会发生失水或聚水,即局部体系是开放的,而整体属于封闭体系,失水不显著。

活性碱(土)金属的迁移、淋滤及其与硅铝组分的分离过程,造成了局部富铝的环境,在合适的温压条件下形成夕线石。相对于原岩富铝,这种富铝方式可能更有利于夕线石的形成。相反,在一些富铝泥质岩中,即使有合适的温压条件,也未必能

够形成夕线石(任留东等,2009)。因此,区域变质作用中夕线片(麻)岩的出现不一定表明其原岩为泥质岩或粘土等富铝沉积岩,或沉积形成于稳定的(被动)大陆边缘或盆地环境,而形成夕线石最为关键的是,在长英质副变质岩中发生剪切变形和显著的深熔作用以及伴随的差异性组分活动。这也就是说,在特定的温压条件下,原岩本身富铝是夕线石形成非常有利的条件,但是变质作用过程中组分的差异性迁移才是夕线石形成的必要条件。

2 夕线石与变形作用

通常,夕线石产于夕线片(麻)岩中,并沿片(麻)理分布(图 2a、2b),特别是在中级变质岩中,夕线石可呈毛发状沿裂隙分布(图 1a、1d, 图 2c、2d),给人以构造定向的印象,如任留东等(2009)强调的片理、非片理组合实际上就是应力影响的产物。通过详细的野外、镜下观察,作者注意到,变质作用中夕线石的出现与片(麻)理有关,但又不同于一般的片状、柱状矿物沿片(麻)理的定向均匀排列,而是沿特定部位相对集中,即非均匀分布(图 2e、2f),从最初出现的毛发状夕线石(fibrolite)-石英的显微聚集团块(图 2a、2b),到露头上的夕线石-石英球(图 1e、1f)。而且,有前期矿物(反应物)如云母和后期矿物(产物)如石榴子石、长石,显示夕线石与这些矿物非同时结晶,表明夕线石形成阶段的特殊性。在变形方式上,尽管从垂直于片(麻)理的角度来看夕线石“白色条纹”可定向分布(图 1d),但在夕线石分布的片(麻)理“面”上,夕线石则无定向。夕线石-石英球内的夕线石排列情况同样如此:露头尺度的团块实际上呈椭球状,沿垂直于椭球 3 个轴方向切片,发现簇状夕线石的方向是随机的,没有任何优选定向(图 2c、2d),而且 3 个方向的切片显示非常类似的结构特征。在夕线石-石英球(图 2c、2d)或富夕线石的片麻理(图 2f)中,夕线石可有定向,而共存的石英并没有定向排列或构造重结晶的迹象。由此推断,毛发状夕线石的定向属于某种流动构造,与变形无关。夕线石的出现与浅色体、伟晶岩和花岗岩密切相伴(图 1a、1b、1c),表明这些地质体的形成可能涉及到溶液或熔体的流动性。

如前所述,夕线石的形成与组分分异作用有关,而分异(分解)组分有两种极端:活性组分和惰性组分,其中活性组分结晶形成浅色体、伟晶脉甚至

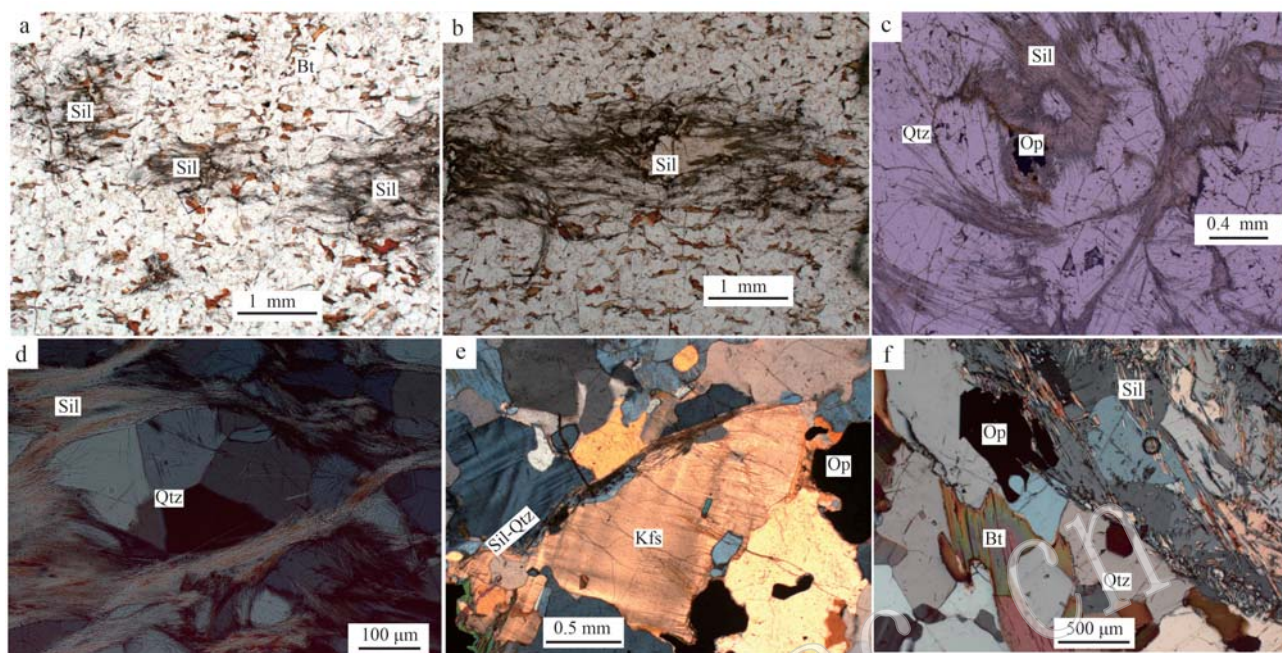


图2 与夕线石有关的变形方面的显微结构

Fig. 2 Microscopic textures of deformation related to sillimanite

a—云母石英片岩中毛发状夕线石初始形成, 单偏光(秦岭岩群); b—云母石英片岩中毛发状夕线石显微团块, 单偏光(秦岭岩群); c—毛发状夕线石的多种方向排列, 单偏光(阜平杂岩); d—毛发状夕线石的多种方向排列, 正交偏光(长乐-南澳构造带); e—夕线石-石英条带导致的“断层”效应, 正交偏光(阜平杂岩); f—富含夕线石片麻理与邻近无夕线石片麻岩的截然接触, 正交偏光(阜平杂岩); Bt—黑云母; Qtz—石英; Sil—夕线石; Op—不透明矿物; Kfs—钾长石

a—initial formation of fibrolite in mica-quartz schist, plane polarized (Qinling Complex); b—fibrolite band in mica-quartz schist, plane polarized (Qinling Complex); c—random orientation of fibrolite, plane polarized (Fuping Complex); d—multi-direction alignment of fibrolite, cross polarized (Changle-Nan'ao belt, SE China); e—fault effect of the sillimanite-quartz foliation, cross polarized (Fuping Complex); f—abrupt contact of the sillimanite foliation and adjacent gneissosity, cross polarized (Fuping Complex); Bt—biotite; Qtz—quartz; Sil—sillimanite; Op—opaque mineral;

Kfs—K-feldspar

花岗岩; 惰性组分结晶形成夕线石, 偶见金属氧化物(图 3a、3b)。夕线石可出现于裂隙中, 多数情况下, 夕线石呈相对富集的片(麻)理, 并表现为“断层”, 其两侧的矿物颗粒如长石、石英基本不连续, 呈现出被“断开”的状态(图 2e)。体系中夕线石集中的“面理”反映了微观尺度的破裂、断裂, 甚至剪切带的位置。夕线石集中于浅色体(脉)的边部(图 1c), 除平行脉壁分布外, 可呈任意方向延伸, 说明夕线石的局部定向显示流动性质, 成分的分异则与组分流动造成的差异性迁移有关, 而不是由单纯的泥质岩原岩富铝所致。

变质作用中, 伴随着体系一定程度的差异性抬升, 局部出现应力, 并有剪切至引张的转换, 导致裂隙形成, 出现局部低压区, 使得浅色体前身的“浆体”(migma? 其成分、性质介于热液和熔体之间)突然失稳脱水, 发生释水反应, 活动组分迁移, 残留

组分聚集, 残留部分形成夕线石-石英(椭)球(图 1e、1f)。

夕线石多在变形-变质早期阶段差异性上升过程中形成, 此时刚出现与浅色体有关的“浆体”, 沿裂隙面(如片理面)的滑动极易发生, 加上变沉积岩体系中各种岩石物性的较大差异, 较易出现差异性运动而造成差异性升降。在隆升趋缓且应力较弱时, 温度达到较高值, 形成相对稳定、静态环境下的石榴子石、斜方辉石、钾长石、斜长石等较为稳定的峰期矿物。之后, 深熔作用结束, 花岗岩等结晶, 体系相对固结, 堇青石、尖晶石(尤其是由石榴子石退变反应而成时)在相对统一的状态(少或无剪切)下于晚期整体隆升时形成, 难以再发生岩石体系内的差异性运动, 即使有, 也是受外部强力的驱动造成局部的强烈剪切, 并对已形成的峰期组合重启、改造和细粒化。

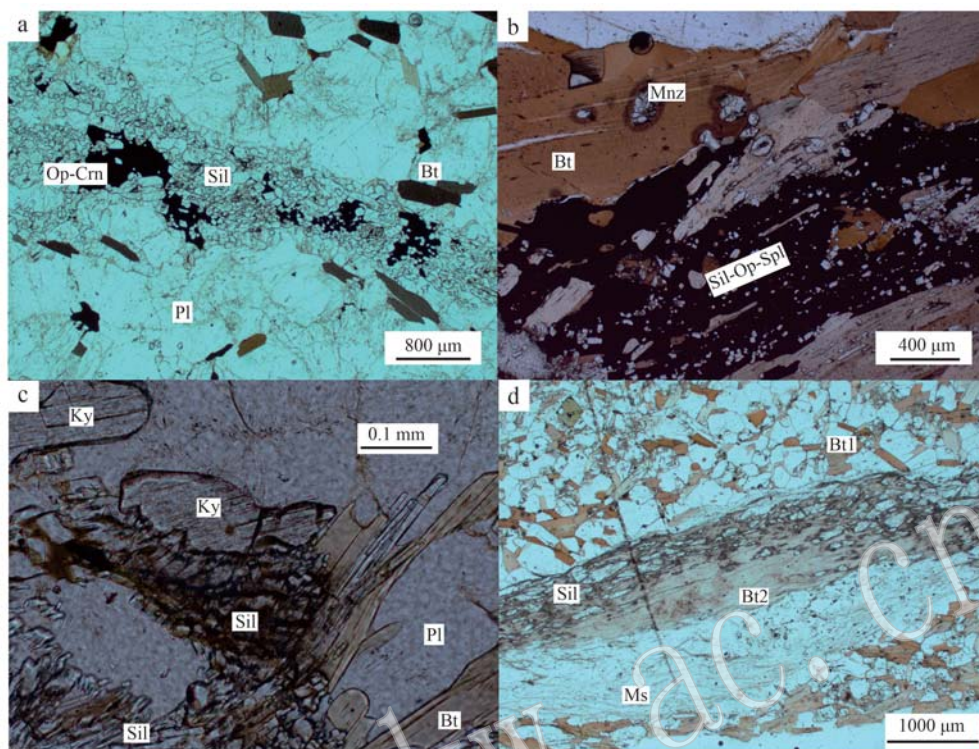


图3 与夕线石有关的分异显微结构(单偏光)

Fig. 3 Microscopic textures of differentiation related to sillimanite(plane polarized)

a—富集夕线石、铁钛氧化物、刚玉集合体,附近有堇青石(东南极拉斯曼丘陵);b—夕线石、铁钛氧化物和尖晶石集合体,围以黑云母(东南极拉斯曼丘陵);c—夕线石之后形成蓝晶石和黑云母(赞皇杂岩);d—夕线石条带周围的晚期黑云母、白云母聚集(长乐-南澳构造带);Bt—黑云母;Crd—堇青石;Qtz—石英;Sil—夕线石;Mnz—独居石;Ms—白云母;Op—不透明矿物;Pl—斜长石;Crm—刚玉;Spl—尖晶石;Ky—蓝晶石

a—sillimanite-rich aggregate with Fe-Ti oxides, corundum and adjacent cordierite(Larsemann Hills, East Antarctica);b—aggregate of sillimanite, Fe-Ti oxides and spinel(Larsemann Hills, East Antarctica);c—sequence of sillimanite to kyanite to biotite(Zanhuang Complex, North China Craton);d—fibrolite band to late biotite(Bt2) and muscovite(Changle-Nan'ao belt, SE China);Bt—biotite;Crd—cordierite;Qtz—quartz;Sil—sillimanite;Mnz—monazite;Ms—muscovite;Op—opaque mineral;Pl—plagioclase;Crm—corundum;Spl—spinel;Ky—kyanite

3 深熔作用中的夕线石

在中高级变质作用条件下,由于变形及伴随的深熔作用和分异作用,可见沿片麻理分布的浅色体,其成分以斜长石、石英为主,偶见钾长石,有极少暗色或不透明矿物,多不具花岗质成分。所以,对浅色体是否由熔体结晶形成一直有争议,或许称之为“浆体”更为合适。这种“浆体”比围岩略富水,可能较为富铝,因为水可提高铝在熔体中的溶解度,不受温度影响,增加1摩尔的水可使Al在熔体中的溶解度增加到原溶解度的2.5倍(Acosta-Vigil *et al.*, 2003)。

深熔作用中,水和挥发分同为“浆体”的组成部分。随着深熔作用的逐步进行,体系中可局部形成

类似于低共熔的熔体,结晶后出现伟晶岩脉、花岗岩脉或团块等切割片麻理的地质体。体系中少量的水可优先进入“熔体”(Thompson, 1983; Vielzeuf and Holloway, 1988)。这些“熔体”可优先吸收邻近围岩、尤其是“浆体”中的流体挥发分。这种“熔体”多数情况下也不是真正意义上的岩浆,而是含有大量水质流体的一种介质,如阜平杂岩中的富碱性长石伟晶岩脉,其锆石Th/U值具有变质锆石的特征,与侵入花岗岩中锆石具有较高的Th/U值有所不同(Keay *et al.*, 2001; 李基宏等, 2004)。

基本平行片麻理的“浆体”因温压的变化而不稳定、趋于分解,活动组分迁移出去,使得“浆体”缺失主要的活动组分。云母脱水熔融时“浆体”的铝饱和指数较低,而接近“熔体”部分水饱和条件下的铝饱和指数较高(Acosta-Vigil *et al.*, 2003)。残余“浆

体”中流体挥发分较少,铝饱和指数较低,导致多余的铝进入转熔相而形成夕线石;若体系抬升明显,富含挥发分组分的“浆体”中的水快速迁移,残余部分容易形成类似淬火结构的细夕线石(fibrolite),与花岗质岩浆活动密切时可出现夕线石-石英球,此时可有云母→夕线石的顺序关系,很容易被认为是云母分解形成夕线石。即使在有水体系中,局部的失水(同时丢失或迁移活动组分)也可出现夕线石(图3b、3c、3d;任留东等,2011)。

在水分含量总体较低的深熔作用过程中,含水矿物升温发生结构脱水,如黑云母向石榴子石转化,少量的水分基本被“浆体”吸收,即水可使“浆体”中Al溶解度增加,造成Al组分的局部富集,并使体系中其他部位水分含量显著降低。“浆体”若失水,夕线石形成。云母+长石→夕线石+石英→石榴子石+钾长石+堇青石($\text{Mica}+\text{Fsp} \rightarrow \text{Sil}+\text{Qtz} \rightarrow \text{Grt}+\text{Kfs}+\text{Crd}$),这些转化不是简单的固相转化反应,而是发生于“浆体”形成及结晶过程中的不同阶段,最后的“干”矿物不仅源自Sil-Bt,更有可能来自“浆体”溶液,或者说,深熔作用中组分的迁移多是渗滤而不是简单的扩散。这种差异性失水很大程度上属于局部渗透式失水,而体系整体失水并不明显。任留东等(2021)强调,深熔作用中流体挥发分亦可局部富集。

少量水及相伴的“浆体”在迁移的同时结合并迁出一定量的硅质组分,这些少量的水进一步收缩、进入近饱和的少量“熔体”,那么,“浆体”中的剩余组分相对富 Al_2O_3 ,并伴随着其他惰性组分(Al_2O_3 、 SiO_2 、 TiO_2 和 $[\text{FeO}^+]$)一起滞留下来,形成夕线石、夕线石-石英和铁钛金属氧化物(图3a、3b),甚至磷灰石、独居石、锆石等的局部富集(图3b)。这一过程中的矿物形成顺序如下:夕线石→铁钛氧化物→石榴子石-钾长石→尖晶石-堇青石±假蓝宝石($\text{Sil} \rightarrow \text{Mgt-Ilm} \rightarrow \text{Grt-Kfs} \rightarrow \text{Spl-Crd} \pm \text{Spr}$)。

南极拉斯曼丘陵高级变质长英质岩石中夕线石和铁钛氧化物的局部聚集与高级变质作用过程中的深熔作用有关,其中伴随活性组分如碱(土)金属组分的迁移和惰性组分如硅、铝、铁组分的滞留和富集(任留东,2021)。夕线石是氧化物残留的一种特殊形式。先是形成夕线石($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$)或 $\text{Sil} \pm \text{Qtz}$,若 SiO_2 过饱和,形成石榴子石;若 SiO_2 不足,出现单一金属氧化物 M_xO_y ,如刚玉(Al^{VI})、磁铁矿、赤铁矿,或多种金属氧化物 $\text{M}_x\text{N}_y\text{O}_z$,如钛铁矿、尖晶石

(Al^{VI})(图3b),直至堇青石、假蓝宝石等。

不论无水深熔作用,还是有水深熔作用所造成的混合岩化作用,均可出现夕线石化,反映了某种相同的过程,即水有利于熔体中Al含量的增加,一旦水消失,夕线石形成。在夕线石片麻岩中,夕线石的形成就说明发生了一定的脱水作用(Patiño Douce & Harris, 1998),区别的只是相伴的矿物组合不同。

伟晶岩的形成与夕线石之间有密切联系,夕线石的出现代表“浆体”或“熔(溶)体”开始生成,之后才发生其它矿物如石榴子石、长石等的结晶。任留东等(2009)认为深熔作用完善后夕线石趋向减少甚至消失,而伟晶岩则是“熔(溶)体”进一步演化而就位、结晶的产物。富含氧化物的组分呈高温汽液态而不是熔体,多以一种富铝的准稳定熔体形式出现于熔体或深熔之前(?)结晶形成伟晶岩(图1c)。因此,刚玉、铁钛金属氧化物相当于伟晶岩的前身,伴随着显著的深熔作用过程(沈其韩等,2004)。最后形成的是典型的硅酸盐熔体(结晶形成花岗岩)和少量伟晶岩。

与变质作用早期进变质阶段云母派生出夕线石(云母→夕线石)相反,变质作用晚期退变产物(逆反应?)则是夕线石向云母的转化(夕线石→石云母)(图3c、3d)。降温阶段可形成含水矿物的镶边组合,如云母类。这一复水化阶段,少或无水体系多形成黑云母;有水体系多为白云母,如毛发状夕线石和常见的夕线石-石英球(nodule)主要由 $\text{Sil}+\text{Qtz}$ 组成,常见白云母,可有黑云母,偶见电气石。可能也与体系的变质温度有关,中高温夕线石之后多形成黑云母(图3b),而中温夕线石之后形成白云母(图3d)。

4 夕线石形成的温压条件与成分介性质

铝硅酸盐 Al_2SiO_5 的同质多像变体夕线石、蓝晶石和红柱石分别形成于不同的温压区间,从而被当做变质温压条件或相图演化的基本参照。一般认为,变质作用的早期出现蓝晶石,之后地温梯度增大,形成夕线石,最后降压阶段出现红柱石(程素华等,2016)。这样,随着温压条件的改变,在不同的 Al_2SiO_5 变体之间应该出现转化或相变。但是,绝大多数情况下,并没有见到蓝晶石和夕线石之间的反

应关系(Jansen & Schuiling, 1976),红柱石的形成往往也与蓝晶石或夕线石没有直接关系。

夕线石 $\text{Al}^{\text{VI}}[\text{Al}^{\text{IV}}\text{SiO}_4]\text{O}$ 、红柱石 $\text{Al}^{\text{VI}}\text{Al}^{\text{V}}[\text{SiO}_4]\text{O}$ 和蓝晶石 $\text{Al}^{\text{VI}}\text{Al}^{\text{VI}}[\text{SiO}_4]\text{O}$ 这3种矿物具有全然不同的晶体结构,它们之间的区别、特别是夕线石和蓝晶石的区别,在于晶体结构中是否存在4配位的铝。铝是一种两性元素,其配位状态的变化除了受温压条件影响外,流体或岩浆活动,特别是介质的组成和性质可能也很重要。含挥发分组分及活性组分的热液或熔体快速迁移、丢失活跃组分的过程,一方面使得残留组分富铝,另一方面还影响到组分的结构状态。某些条件下可以形成夕线石,另外条件下则形成铝硅酸盐的其他变体红柱石或蓝晶石。蓝晶石的形成多与溶液有关,往往形成于进变质阶段;红柱石多形成于变质作用的晚期,且与蓝晶石类似,应力不显著;而夕线石的出现,多与峰期变质作用有关,伴随着应力活动,尤其是发生显著的深熔作用。近年来变质作用研究中较为集中的超高温变质作用中形成的是柱状夕线石,也与无水深熔作用有关。与较低温度下的组分快速渗透失水、出现类似淬火结构的毛发状夕线石不同,超高温下的变质、深熔作用组分的渗透、扩散均很显著,“浆体”与熔体之间的界限较为模糊,没有剧烈失水、复水过程。但相同的是未能形成典型的熔体,并出现露头尺度的矿物组合及含量的明显非均一性,如内蒙天皮山的超高温变质作用。

夕线石形成过程中,体系出现显著的流体或熔体,即有相当程度的流动性,其中液态介质促使部分金属阳离子迁移,特别是碱(土)金属的迁出(淋滤)(Vernon, 1979; Kerrick, 1990),如高级区混合岩可能具有酸性条件,而夕线石-石英分凝体或脉体可能代表了伟晶质熔体或浆体,其中明显的 H^+ 的活动造成碱金属元素的丢失,从而限制了碱性长石的结晶(Nabelek, 1997),如印度孔兹岩(khondalites)中无长石。更多的情形是,含夕线石的岩石中有长石,但夕线石与长石不是同时形成。

夕线石晶体结构中的4、6配位各占一半,长石中的铝均为4配位,说明夕线石形成时介质条件不利于铝(Al^{IV})硅酸盐出现,而夕线石之后较容易出现斜长石,偶见钾长石,与石榴子石的关系亦类似,多为夕线石之后形成石榴子石,反映了深熔作用中组分的迁移、淋滤过程。夕线石的形成与酸性熔体的迁移、淋滤有关,体系有相当程度的溶液或熔体

的流动性,如深熔作用的初期、硅铝质浆体结晶的晚期或后期,液态介质中一定程度的酸性熔体的迁移、淋滤作用,可促使部分金属阳离子迁移,残留组分形成夕线石。

铝硅酸盐 Al_2SiO_5 的不同变体虽然成分相同,其所产出的岩石类型和环境仍有显著的差别,铝硅酸盐多变体的形成一方面受温压条件控制,另一方面,流体或熔体的性质也很重要,如溶液介质的酸碱度可影响到铝的配位。这个问题有待进一步研究。

5 结论

含夕线石的变质岩原岩未必对应泥质岩,富夕线石岩石成分上更不能与任何的泥质岩成分对应。区域变质作用中夕线片(麻)岩的出现不能说明其原岩为泥质岩或粘土等富铝沉积岩,或沉积形成于稳定的(被动)大陆边缘或盆地环境。

夕线石的形成与变形、变质作用,尤其是深熔作用密切相关。浅色体、伟晶岩及花岗岩等,均可由变质、深熔作用演化而成。夕线石形成的关键是伴随 Al_2O_3 相对增加的过程,如深熔作用中碱(土)金属的迁移、淋滤及其与硅铝组分的分离,从而造成了局部富铝的环境,形成夕线石的部位属于局部开放体系。在特定的温压条件下,原岩本身富铝是夕线石形成非常有利的条件,但是,变质作用过程中组分的差异性迁移才是夕线石形成的必要条件。

夕线石尤其是毛发状夕线石对应于变形-变质作用发展至特定阶段的产物,夕线石多是变形-变质早期阶段差异性上升过程中形成的,并显示夕线石“应力定向”的假像。组分的迁移可能伴随溶液或熔体组分的流动,形成夕线石及相关矿物的聚集,与浅色体有关的“浆体”、流体挥发分及熔体造成的活跃组分-惰性组分之间的分异形成不同的变质矿物演化阶段。

铝硅酸盐 Al_2SiO_5 的不同变体虽然成分相同,其所产出的岩石类型或环境仍有显著的差别,铝硅酸盐多变体的形成一方面受温压条件控制,另一方面,流体或熔体的性质也很重要,介质成分可影响到铝的配位。

致谢 国家海洋局极地考察办公室和中国极地研究中心在南极考察期间给与了后勤支持和保障,

两名匿名审稿人对本文认真、细致地审阅并提出了很好的修改意见,在此一并表示感谢。

感谢沈其韩恩师的谆谆教诲,适值恩师百岁寿辰,谨以此文向先生表示祝贺,祝先生幸福、安康!

References

- Acosta-Vigil A, London D, Morgan VI, *et al.* 2003. Solubility of excess alumina in hydrous granitic melts in equilibrium with peraluminous minerals at 700~800°C and 200 MPa, and applications of the aluminum saturation index[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 146: 100~119.
- Cheng Suhua and You Zhendong. 2016. *Metamorphic Rocks*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 241~243 (in Chinese).
- Fitzsimons I C W. 1996. Metapelitic migmatites from Brattstrand Bluffs, east Antarctica—Metamorphism, melting and exhumation of the mid-crust[J]. *Journal of Petrology*, 37: 395~414.
- Ge Wenchun, Lin Qiang and Fang Zhanren. 1991. A rapakivi by assimilation and contamination in Kuandian, Liaoning Province, China [J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 21(2): 135~141 (in Chinese with English abstract).
- Grew E S and Hinthore J R. 1983. Boron in sillimanite[J]. *Science*, 221: 547~549.
- Jansen J B H and Schuiling R D. 1976. Metamorphism on Naxos: Petrology and geothermal gradients[J]. *American Journal of Sciences*, 276: 1 225~1 253.
- Keay S, Gordan L and Buick I. 2001. The timing of partial melting, Barrovian metamorphism and granite intrusion in the Naxos metamorphic core complex, Cyclades, Aegean Sea, Greece[J]. *Tectonophysics*, 342: 275~312.
- Kerrick D M. 1990. The Al_2SiO_5 polymorphs[A]. Ribbe P H. *Reviews in Mineralogy* [C]. Michigan: Mineralogical Society of America, Book Crafters Inc., 22: 311~352.
- Li Jihong, Yang Chonghui and Du Lilin. 2014. Zircon origin and SHRIMP U-Pb dating of the anatectic pegmatites in Pingshan County, Hebei Province[J]. *Progress in Natural Science*, 14(7): 774~781 (in Chinese).
- Nabelek P I. 1997. Quartz-sillimanite leucosomes in high-grade schists, Black Hills, South Dakota: A perspective on the mobility of Al in high grade metamorphic rocks[J]. *Geology*, 25(11): 995~998.
- Patiño Douce A E and Harris N. 1998. Experimental constraints on Himalayan anatexis[J]. *Journal of Petrology*, 39: 689~710.
- Ren Liudong. 2021. Anatexis and enrichment mechanism of the Fe-Ti oxide minerals in the quartzofeldspathic gneisses from the Larsemann Hills, East Antarctica[J/OL]. *Journal of Geomechanics*, 27(5): 736~746. doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.060 (in Chinese with English abstract).
- Ren Liudong, Geng Yuansheng, Du Lilin, *et al.* 2011. Anatexis and migmatization of the Fuping Complex, North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1 056~1 066 (in Chinese with English abstract).
- Ren Liudong, Geng Yuansheng, Wang Yanbin, *et al.* 2007. On protolith of the sillimanite gneisses in the Larsemann Hills, East Antarctica [J]. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 75~84 (in Chinese with English abstract).
- Ren Liudong, Li Chong, Wang Yanbin, *et al.* 2016. Metamorphic zones and constraining on timing of the major metamorphism event in the Qinling Complex, western Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(7): 1 934~1 948 (in Chinese with English abstract).
- Ren Liudong, Wang Yanbin, Liu Xiaochun, *et al.* 2008. The exsolution assemblage of sillimanite in the quartzofeldspathic gneiss of the Larsemann Hills, East Antarctica[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(6): 524~528 (in Chinese with English abstract).
- Ren Liudong, Wang Yanbin, Yang Chonghui, *et al.* 2012. Two types of metamorphism and their relationships with granites in the Mashan Complex[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2 855~2 865 (in Chinese with English abstract).
- Ren Liudong, Yang Chonghui, Wang Yanbin, *et al.* 2009. Formation of sillimanite in the high-grade quartzofeldspathic gneisses and its relations with deformation-metamorphism-anatexis—A case study in the Larsemann Hills, east Antarctica [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1 937~1 946 (in Chinese with English abstract).
- Ren Liudong, Zong Shi, Wang Yanbin, *et al.* 2021. Formation process and petrological implication of the borosilicate assemblage grandierite, prismaticine and tourmaline in the high-grade quartzofeldspathic gneisses in the Larsemann Hills, East Antarctica[J/OL]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(2): 575~588 (in Chinese with English abstract). doi: 10.18654/1000-0569/2021.02.15
- Shen Qihan, Geng Yuansheng, Wang Xinshe, *et al.* 2004. Petrology, mineralogy and formation environment of a corundum-sillimanite-K-feldspar gneiss[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(2): 99~106 (in Chinese with English abstract).
- Thompson A B. 1983. Fluid-absent metamorphism[J]. *Journal of Geological Society of London*, 40: 533~547.
- Vernon R H. 1979. Formation of late sillimanite by hydrogen metasoma-

- tism (base-leaching) in some high-grade gneisses[J]. *Lithos*, 12: 143~152.
- Vilzeuf D and Holloway J R. 1988. Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic system[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 98: 257~276.
- Wang B, Wei C J, Tian W, *et al.* 2020. UHT metamorphism peaking above 1 100°C with slow cooling: Insight from pelitic granulites in the Jining Complex, North China Craton[J]. *Journal of Petrology*, 6: 1~27.
- Wang Renmin, He Gaopin, Chen Zhenzhen, *et al.* 1987. Discrimination Diagrams in Recovering Metamorphic Rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- 程素华, 游振东. 2016. 变质岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 241~243.
- 葛文春, 林 强, 方占仁. 1991. 宽甸环斑花岗岩的同化混染成因[J]. *长春地质学院学报*, 21(2): 135~141.
- 李基宏, 杨崇辉, 杜利林. 2004. 河北平山深熔伟晶岩锆石成因及 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. *自然科学进展*, 14(7): 774~781.
- 任留东. 2021. 南极拉斯曼丘陵长英质片麻岩的深熔作用与铁钛氧化物的聚集机制[J/OL]. *地质力学学报*, 27(5): 736~746. doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.060
- 任留东, 耿元生, 杜利林, 等. 2011. 华北克拉通阜平杂岩的深熔和混合岩化作用[J]. *岩石学报*, 27(4): 1 056~1 066.
- 任留东, 耿元生, 王彦斌, 等. 2007. 关于东南极拉斯曼丘陵夕线片麻岩类原岩恢复问题的讨论[J]. *地学前缘*, 14(1): 75~84.
- 任留东, 李 崇, 王彦斌, 等. 2016. 豫西秦岭杂岩变质带的分布及主期变质时代的限定[J]. *岩石学报*, 32(7): 1 934~1 948.
- 任留东, 王彦斌, 刘晓春, 等. 2008. 南极拉斯曼丘陵长英质片麻岩中夕线石的出溶现象[J]. *岩石矿物学杂志*, 27(6): 524~528.
- 任留东, 王彦斌, 杨崇辉, 等. 2012. 麻山杂岩的两种变质作用及其与花岗岩的关系[J]. *岩石学报*, 28(9): 2 855~2 865.
- 任留东, 杨崇辉, 王彦斌, 等. 2009. 长英质高级片麻岩中夕线石的形成与变形-变质-深熔作用的关系——以南极拉斯曼丘陵区为例[J]. *岩石学报*, 25(8): 1 937~1 946.
- 任留东, 宗 师, 王彦斌, 等. 2021. 东南极拉斯曼丘陵硼硅酸盐矿物组合硅硼镁铝矿-硼柱晶石-电气石的形成过程及其岩石学意义[J/OL]. *岩石学报*, 37(2): 575~588. doi: 10.18654/1000-0569/2021.02.15
- 沈其韩, 耿元生, 王新社, 等. 2004. 一种刚玉夕线钾长片麻岩的岩石学矿物学特征及形成环境[J]. *岩石矿物学杂志*, 23(2): 99~106.
- 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 等. 1987. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京: 地质出版社.

附中文参考文献