浙江湖山萤石矿床成矿热源问题探讨

浙江省第七地质大队　吕新前

一、引言

在脉状萤石矿床成矿热液成因研究中，成矿热液形成中水的来源与大气降水有关和成矿物质的来源与围岩有关的结论因为有大量的测试数据支持而令人信服。但热源与燕山期的岩浆火山活动有关的认识是基于萤石矿床与火山岩、侵入岩在时空上密切产出的关系得出的地质推断，这种推断难以解释以下两点事实：

1、是与萤石矿成矿有关的花岗岩体多形成于燕山时期，成岩年龄多在140Ma左右，如八都花岗闪长岩为138~161Ma、新桥花岗岩为143Ma、岩前二长花岗岩为121.75Ma，而萤石的成矿时代一般在燕山晚期，成矿年龄多在85Ma以后，它们之间有60Ma左右的时差。

2、是与萤石成矿有关的花岗岩体侵入在晚侏罗世火山碎屑岩中，在遭受风化剥蚀后被白垩纪红层覆盖，而萤石矿成脉状产于切穿白垩纪红层的断裂带中，显然，当萤石成矿作用发生时，岩体已经冷却，将成矿热液的热源归结为岩浆或火山活动产生的热的观点难以自圆其说。

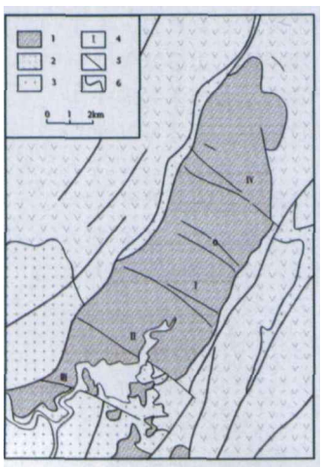


图1 湖山萤石矿田地质略图

1、白垩纪 2、侏罗纪 3、钾长花岗斑岩 4、萤石矿带编号 5、断层 6、地质界线

因此有必要对萤石矿床成矿热液的热源问题作进一步研究。本人认为花岗岩浆固结成岩后岩体的放射性成因热的积累和必要的热储构造的存在所产生的热效应作用是萤石成矿热液形成的主要原因。

湖山萤石矿田在萤石成矿与花岗岩成岩的年代时序方面表现的较为清晰，同时又有现代地热异常相伴。因而，这里以湖山萤石矿田为主结合其它矿田有关资料对这一问题进行探讨。

二、成矿背景与矿床特征

赋存萤石矿的湖山白垩纪盆地位于江山至绍兴大断裂以南的侏罗纪火山喷发带上，并与燕山期酸性侵入岩洪公岭岩体相伴。资料表明，该盆地为两条呈北北东走向断层所夹的火山断陷盆地（图1），其内堆积了较厚的内陆湖盆相红色沉积岩夹火山岩，两侧为广布的晚侏罗世火山碎屑岩，基底为洪公岭岩体边源相钾长花岗斑岩。

萤石矿脉产于盆地内发育的一系列近于平行等间距分布的北西向断裂带中，具有相似的矿床特征：矿体的形态较简单，多呈脉状充填于张性断裂带中，单脉长200~1200米，延深200~500米，矿石的结晶分易较好，品位较高，与围岩的界线较清楚，围岩蚀变不发育，以弱硅化和高岭土化为主。这些特征与浙江大多数浅成低温脉状萤石矿床的成矿特征一致，所不同的是成矿的温度显得更低，成矿的时代延续得更迟。

1、萤石矿脉与方解石脉及鲕状高岭土脉相伴，矿石中含有较多的蛋白石等低温矿物，矿体厚大部位常出现晶洞，总体显示出成矿的温度很低。研究表明，矿田主要有两个成矿期，据萤石矿物包裹体测温资料，各成矿时期的均一温度的范围主要在60~130℃，晚期则更低，为35~104℃(表1)，与本区当代地下热水相似。

表1　山萤石矿田萤石矿物包裹体均一温度

矿区	平均温度	均方差	变化范围	主成矿温度
I	95.40	26.67	42.06-148.76	60-130
II	111.2	25.55	60.11-162.29	70-130
III	128.52	28.53	71.46-185.58	80-160

2、包裹体液相分析表明，成矿溶液中含有SiO_2、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^{+}、K^{+}、HCO^{-3}、SO_4、F^{-}、Cl^{-}等离子，个别样品中含有0.006-0.008ppm的Al^{3+}，成矿溶

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

液Na^+大于K^+，属钠质碱性溶液(表2)。

表2 包裹体液相成本浓度表（℃）

矿区	H_2O (ml/g)	SiO_2 (ppm)	MgO (ppm)	CaO (ppm)	K_2O (ppm)	Na_2O (ppm)	SO_4 (ppm)	HCO_3^- (ppm)	Cl^- (ppm)	F^- (ppm)	(t°) 盐度
I	0.1885	267.37	9.72	298.27	20.72	100.11	30.56	819.42	19.31	183.77	31.82
II	0.2629	102.44	5.98	187.88	17.29	69.04	22.88	376.64	14.00	113.20	23.07
III	0.1878	226.30	9.88	305.37	19.61	106.78	31.81	827.94	19.30	176.68	31.81
平均	0.2010	214.58	9.15	283.08	19.16	98.55	29.81	715.74	18.26	166.65	30.09

成矿溶液中不仅盐度低，气相含量也低，$CO_2+N_2+O_2$混合气体的含量为63.17ml/g，有趣的是成矿溶液的离子类型属Na-Ca-HCO^{-3}-F与本区当代地下水属Na地下水属CO^{-3}类型基本一致，这些都反映出矿田的成矿温度是很低的。

3、对矿田成矿物质来源的研究证实：含矿溶液是钾长花岗斑岩和红层等岩石中的Ca、F等成矿物质溶解于地下水中，随着地下水的循环作用，使这些成矿物质运移到一定的深部特别是在构造带聚集，从而形成含矿热液。笔者对该区构造带不同深部的地下水的矿化度及含氟量的研究发现，随标高的降低，氟含量及矿化度也随之增加，说明成矿溶液在构造带深部形成的可能性。如在332米标高的地下水中，F^-含量最高值可达11mg/L，同时测得Ca^{2+}的含量为48.95mg/L，其离子积已大于CaF_2的浓度积，成为过饱和溶液。现代地下水循环作用将使萤石成矿作用继续发生。

上述特征并结合其它地区的萤石成矿特征分析可以看出萤石矿成矿热液与典型的岩浆热液矿床的热液活动有很大区别，不仅反映在矿石组分的简单，蚀变类型的单一以及成矿温度低、成矿时代迟上晚，而且在热液的含盐度、酸碱度和气相组分上也有显著的差别。因此，萤石矿的成矿热液的形成不太可能是岩浆活动的结晶分异作用的直接产物。

三、钾长花岗斑岩与成矿的关系

钾长花岗斑岩作为矿田及盆地构造的基底，并为成矿提供了成矿物质的主要来源，与成矿的关系十分密切，因而对其地质特征、化学成分和成因进行了较深入的研究。有关资料表明，该岩体是本省最大的侵入岩洪公岭边缘相的一部分，其SiO_2含量大于71%，K_2O+NaO含量大于7%，K_2O大于Na_2O，CaO小于1%，属铝过饱和岩石及碱性岩系。根据鲍文托脱三元图解，侵入时岩浆水的含量约3.4%，温度740℃，岩浆房顶部深度为2公里左右。因而属于燕山时期与大规模火山喷发相伴随的次火山岩侵入体。该岩体与萤石成矿关系主要表现在：

1、从萤石矿空间分布上看，洪公岭岩体对区域萤石矿床分布的控制作用十分明显（图2）。长坞尖、黄沙腰、柘袋口等一系列萤石矿床都围绕该岩体分布，从而构成浙西南地区最主要的萤石成矿区。矿田内部各矿体与钾长花岗斑岩在空间上的关系密切。即萤石矿脉均产在钾长花岗斑岩与红层的接触带附近。

2、从各矿带成矿温度统计看，围绕着岩体，自南而北，成矿温度逐渐下降，其下降梯度为33.2/10km。

3、成矿溶液与岩体有成生上的联系，成矿物质氟与钙主要来自于钾长花岗斑岩。

萤石矿与钾长花岗斑岩这一关系显示出驱动萤石成矿热液形成及活动并最终得以成矿的热源应该来源于钾长花岗斑岩。张春霖等人研究认为，本省大型特大型萤石矿田均对应着重力低，表征矿田深部存在巨大的酸性岩浆岩（热源）。许多萤石密集的地方都有明显的剩余重力负异常。即使地表岩体出露较小甚至没有岩体出露，但据剩余重力负异常推测深部有隐伏岩体存在。浙江武义地区密集分布了大大小小萤石矿近50个，其中大型萤石矿11个，这一地区展布有一个大型重力负异常。类似这种情况浙江尚有多处。这个重要现象表明大型萤石矿田形成的重要条件是深部应有一个大型热源。

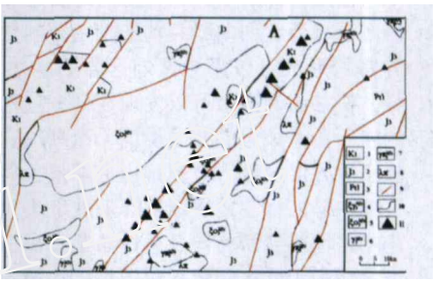


图2 洪公岭岩体周边萤石矿分布图

1、下白垩纪 2、上侏罗纪 3、下先古界 4、钾长花岗斑岩 5、石英正长岩 6、花岗岩 7、花岗斑岩 8、酸性流火山岩 9、断层 10、地层界线 11、萤石矿

四、萤石矿田地热特征

浙江省萤石矿尤其是产于白垩纪断陷盆地中的萤石矿常伴有地下热水活动，现代地热异常存在是较为普遍的现象。武义矿田先后在杨家、塔山下、溪里、徐村、鱼形山等矿床的矿坑中发现地下热水，水温在30~44℃。经计算，武义地区地温增温率为8℃/100m。湖山萤石矿田也属于地热异常区，在各矿区的钻孔中，都具有较高的井温。如Ⅲ矿区抽1孔，井温最高达37℃，矿区的ZK204孔，其井温也达39℃。特别是Ⅱ-2 矿体施工的11个钻孔中有9个遇较高井温，井温在37~40℃。根据钻孔井温结果，计算出地增温梯度平均为7℃/100m，高于浙江省正常的地增温梯度水平值2-3/100m，表明本区存在着一个较大规模的地热田。其井温在分布上有以下特点：

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1、井温值的变化与钾长花岗斑岩与红层的界面标高的变化有关，无论是同一埋深还是同一标高的变化情况都是一致的，它反映了井温的变化与钾长花岗斑岩的出露位置有关。

2、井温异常变化地段与北西向的含矿断裂有关，这是因为北西向断裂中的地下热水叠加所致。

3、地热主要出现在岩体中，钻孔在红层中钻进时井温一般在20℃以下，而当揭露钾长花岗斑岩时，井温快速上升到35℃以上。而当没有红层覆盖时，岩体中的井温则没有异常出现。

上述特征表明，钾长花岗斑岩是热储层，红层是封闭层，而北西向断裂构造是主要的热水通道。地热异常的形成可以用异常地区岩石的热导率不同来解释，在井温测量中可以发现在同一钻孔中，低热导率的岩石具有较大的井温梯度，而高热导率的岩层具有较小的井温梯度，也就是说上部低热导率的红层成为下部热储的帽盖或屏蔽从而形成地热异常。使人感兴趣的是地热异常为什么总是与萤石矿田相伴，热储构造的特征为什么同萤石矿田控矿构造的形式相一致，地热水的活动方式及其水化学类型为什么与萤石成矿热液的特征相似。这是否在喻示这样一个事实：萤石成矿热液系统与现代地下热水系统同属一个地热活动系统，现代地下热水系统是古代萤石成矿系统的继续，而这个系统的形成均与钾长花岗斑岩固结后的热活动有关。

五、热源探讨

热液矿床不仅要解决成矿物质的来源、水的形成，更需要解决热源问题。种种迹象均显示出湖山萤石矿的形成上与钾长花岗斑岩的活动在成因上有着密切的关系。现在存在的问题是冷凝后的岩体是否也会重新变热，为成矿提供热源呢？这就是本文需要讨论的问题。

1、对成矿热源的一般认识

探讨成矿热液的成因对认识热液矿床的形成和分布规律并进而指导找矿预测具有重要意义。对于热液矿床来说，地壳浅部温度和压力等条件的改变是矿床得以形成的最基本的因素。多数矿床学家认为与热液成矿有关的热主要与大地热流及花岗岩侵入体冷凝释放热有关，两种热源在成岩成矿过程中的作用是不同的：

大地热流是直接从地球内部（下部地壳及地幔）传导至地壳浅部的热量，是地球内热在地球表层的直接反映。研究表明，热流值变化大的地方恰好与岩石圈板块的边界相吻合。在海洋部分，最高热流出现在大洋中脊。在大陆部分，最高热流分布在新生代构造活动区和现代火山活动区。在古老的地盾区内，若自中生代、新生代以来转为活化或受到邻区地壳活动的影响，也可出现较高的热流值。热流值的分布与地质构造区的时代和活动性密切相关的事实表明，地壳的活动性与地幔的热状况存在着内在的联系。大地热流导致深部地壳部分熔融产生基性玄武岩浆和酸性花岗岩浆，因而对全球成矿带的分布具有控制作用。

花岗岩侵入体在其冷凝过程中将释放出大量的热量。如熔体降温至液相线温度过程、液相熔体转变为固相结晶过程以及岩体冷凝降温至热液成矿温度过程中都将释放出大量的热量。季克俭等在研究华南与花岗岩有关的热液矿床时对成矿的热源进行了大量有效的论证，认为与岩浆岩相伴生的热液矿床的热源应是岩浆或热的岩浆岩。从热液的产物——矽卡岩、蚀变、矿化的规模和它们离岩体的距离都与岩体的大小有关，即热液产物的生成受岩体总热量控制，岩体规模愈大，总热量愈大，能形成的热液产物愈多，所以，热液的热量主要直接来自浅部的岩浆或岩体，而不是来自深部岩浆房。因此，花岗岩侵入体在其冷凝过程中将释放出大量的热量，对热液矿床的形成和分布有直接的控制作用。

岩浆的喷发与侵入等热事件是地壳发展史中最普遍的热现象，因而在研究矿床的热源问题的时候，人们总是将其与岩浆活动相联系。无论是火山热液成矿说或是岩浆期后热液成矿说，成矿所需的热能总是被认为由岩浆活动提供的，既便是附近少见有侵入岩或火山岩存在的地区的浅成低温热液矿床，其热液的形成也被归结于其深部可能存在的岩浆活动。总之，由于成矿热液的热来源与岩浆活动有关，热液矿床都可以看成是岩浆体系某个活动阶段的产物。然而，许多被称为岩浆期后热液脉状矿床与其共生的岩浆岩虽有成因上的物质联系，但其形态显然受后期区域构造控制，成矿的时段上与赋矿的主岩有较大的时差，又缺少明显的岩浆热液蚀变的产物。它们显然不是岩浆侵入时的形成的成矿热液的产物，即它们的热源不可能来自于岩浆热。

HHP花岗岩岩体固结后对成矿的热效应的研究为固结成岩后的花岗岩能继续为成矿提供来源认识提供了佐证。1985年国际花岗岩热液循环和矿床成因会议后受到了矿床界的关注。HHP花岗岩是含放射性矿物较高的花岗岩类，它在固结成岩后长期产生放射热，成为局部异常中心，从而加热下渗的天（海）水引起环流，并萃取花岗岩自身或其围岩中的矿质形成工业富集。HHP花岗岩成矿的独特意义在于热储衰竭极为缓慢，大大延长了花岗岩的成矿时限，与HHP花岗岩有关矿床的成矿年龄可以远小于花岗岩的侵位和固结年龄。众所周知，放射性元素生热量即放射性核素在衰变过程中放出的各种能量的射线与周围的物质作用

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

产生的热量是地球最主要的热源。地壳岩石中射线的强度基本上由铀、钍、钍三个衰变系列和钾产生。各类岩石，特别是燕山期重熔花岗岩含有较高的U、Th、K，具有较高的放射性产热率。而上覆的沉积岩的热导率相对较低，故在建立热平衡的过程中，将有部分放射成因的热逐渐积累并使岩体的温度有所增高。南京大学章邦桐等人对华南花岗岩型铀矿床热源的研究开创了国内研究HHP花岗岩与成矿关系的先河。他们的研究表明成矿热液的热源与岩体的放射性成因热有关，放射性成因热可使岩体接触带温度增高至133℃，中心达323℃，满足成矿温度（150—250℃）的需要。根据他们的研究成果推理，岩体的放射性成因热有可能是许多称之为岩浆期后热液矿床的真正热源。对于萤石成矿而言，燕山时期侵入的花岗岩在其固结成岩后，由于其较高的放射性物质含量，在适当的封闭条件下，放射成因的热逐渐积累可使岩体的温度增高，为萤石成矿提供热源。

2、关于花岗岩体放射性成因热的计算

（1）花岗岩体放射性成因热场状态的描述可由如下数学表达式表达：

$$\rho_m C_m \frac{\partial T}{\partial t} = A - qC_f\left(\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{\partial T}{\partial y}+\frac{\partial T}{\partial z}\right) - K_m\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)$$

式中：

P_m–岩石密度；

C_m–岩石比热容；

T–温度；

t–时间；

A–单位岩石体积内放射性元素在单位时间内产生的放射成因热；

q–水溶液的渗透速度；

C_f水溶液的比热容；

K_m–饱和了水溶液的岩石热导率。

这种计算十分复杂。但人们关心的是岩体与红层接触界面附近是否能达到满足萤石成矿时的温度，故可考虑在一维状态下（垂向）采用大地热流传导公式和热流值与岩石放射性生成热率之间存在的线性关系公式来计算。其公式如下：

$$q = q_0 + D.A \qquad q = -K\frac{dT}{dn}$$

式中：

q–地表热流值，单位HFU(Jm/cm2s)

q_0–大地热流值，单位HFU(Jm/cm2s)

K–岩石的热导率，单位Jm–1s–1℃–1

D–相当于花岗岩厚度，单位cm

A–花岗岩岩体的放射性产热率，单位HGU（4.148×10^{-8}Jcm–3s–1）

$\frac{dT}{dn}$–温度对深度的导数，即地热梯度

根据湖山萤石矿田勘探资料，岩体与红层的岩石的有关物理参数取值如表3。

表3 湖山萤石矿田岩石物理参数

红层放射性含量	13.3FGU	岩体热导率	4.84—8.77
岩体放射性含量	25.32FGU	红层厚度	1.5km
红层热导率	1.94-3.37	岩体的计算厚度	7km

注：已按国际原子能机构推荐的单位换算

按上述公式及参数计算，放射性成因的热可使钾长花岗斑岩与红层接触带附近的温度升高至106.62℃，满足萤石成矿温度的要求。

（2）萤石矿田现代热储温度计算

对萤石矿田存在的现代地热田热储温度的计算有助于更好的理解萤石成矿热液的形成与花岗岩体之间的关系。如果将萤石矿田现代地热田视为花岗岩放射性热形成的热液活动系统的延续，现代地下热水系统的存在无疑是古代萤石成矿热液活动系统曾经存在的最好证据。

热水系统中水的最高温度（基础温度）的确定常用地下热水的某些化学特征（组分或元素之间的比值）来判断。其原理主要基于来源于大气降水的地下水在其深部循环时，由于在各种不同温度和压力下，与围岩的相互作用溶解了各类物质而形成了特殊的化学成分。同理可得那些受温度控制的并与其相关的化学成分（组分）便成了热水的温度指示计。根据湖山等萤石矿田地下热水水温及化学组分特征，采用K–Mg及SiO_2地热温标计算公式计算结果见表4：

表4 热储温度及深度计算成果表

水温（℃）	地温梯度（℃/100m）		K	Mg	SiO_2	热储温度（℃）		热储深度（m）		次生热储深度（m）	
	Δt_1	Δt_2	Mg/l			t(K/Mg)	$t(SiO_2)$	h_1(K/Mg)	$h_2(SiO_2)$	h_3(K/Mg)	$h_4(SiO_2)$
39.0	2.38	6.84	2.10	3.16	60.0	47.0	102.0	1227	3538	426.9	1231.0
42.5	2.38	7.9	4.3	7.7	28.0	51.7	6.57	1416	461	364.7	633.9
37.4	2.38	8.11	2.7	5.7	34.0	45.38	84.5	1150	27.94	337.6	820.0

计算结果证实花岗岩当放射性热使岩体升温后，其地热系统将长期存在。浙江省之所以形成众多的规模巨大的萤石矿田与这种地热系统的长期作用是分不开的。

六、结论

燕山早期酸性侵入岩虽形成时代早于红层，但由于两者明显不同的热导率和放射性含量，当岩体在红层的有效覆盖下，由于放射性元素脱变的生成热的有效积累，使岩体的温度超过萤石的成矿温度，在地下水的循环作用下，形成成矿热液系统，继而形成规模巨大的萤石矿田。这一认识能较好的理解浙南地区萤石矿田均产于叠加于晚侏罗世次火山岩或破火山口的白垩纪盆地的原因。将萤石的成矿作用与现代地下热水的形成相联系，能为在该区寻找地下热水或地热田提供依据。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net