地 质 学 报

1989 年 ACTA GEOLOGICA SINICA 第 3 期

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

论超镁铁质岩型温石棉矿床成矿模式

万 朴

（四川建筑材料工业学院，四川绵阳市）

绝大多数温石棉矿床都赋存在蛇绿岩建造的超镁铁质岩中。本文论及的温石棉矿床是在板块聚合后的大陆蛇纹石化环境，以大气降水来源的深循环热水为主的热液交代超镁铁质岩，通过交代-充填结晶作用而形成的。多期的叠加蛇纹石化作用使岩体达到成棉临界状况。有利的裂隙构造体系的发育，相对稳定的地质环境，是温石棉矿床成生的重要条件。在不同的大地构造背景及成矿地球化学作用条件下，可以形成 3 种亚类型温石棉矿床。

温石棉（纤蛇纹石石棉）矿床分为超镁铁质岩型和镁质碳酸岩型两大类。前者占温石棉总储量的 98% 以上。关于超镁铁质岩型温石棉矿床的成矿模式问题，已有多种假说，有 Велинский (1974) 的自变质模式，Riordon (1981) 的它变质成矿模式，Wicks 等(1977)的渐退-渐进蛇纹石化及温石棉成矿模式[1)]，等等。上述各种观点主要着眼于蛇纹石化作用及石棉脉成因的概括，而对温石棉矿床成矿作用及时、空分布规律，尚缺乏深入的本质反映。

一、温石棉矿床的成矿作用

一般认为温石棉矿床的形成是镁质岩经受热液蚀变作用的结果。近代关于蛇纹石及温石棉的矿物学、矿床学和地球化学研究进展，为深入认识温石棉矿床的成矿作用特征提供了更多的理论依据和实际资料。

全球性的温石棉矿床研究证实，多数温石棉矿床都与板块聚合部位的蛇绿岩建造有成生联系。板块聚合部位这种特定的构造环境，既保证了成棉物质基础和储棉构造裂隙的发育，控制了温石棉矿床成矿作用，也决定了温石棉矿床的分布规律。我国目前已探明的大、中型温石棉矿床，主要分布在以下几个蛇绿岩带中，即阿尔金山带、祁连山带、南秦岭带、康滇带、藏北-澜沧江带、金沙江-哀牢山带及天山带。其中，以阿尔金山带和祁连山带中赋存的温石棉矿床较多，是我国的两个著名石棉成矿带。温石棉矿床赋存在蛇绿岩建造下部的似层状超镁铁质岩中。含棉岩体侵位时代，从晋宁期、加里东期、华力西期至燕山期均有。但多属加里东期和华力西期，大多已完全蛇纹石化。原岩主要为斜辉辉橄岩和斜辉橄榄岩，有时也有纯橄岩。世界上许多著名的温石棉矿床也有同样的时、空分布

1) Wicks, F. J., 万朴, 1985, 纤蛇纹石石棉矿物和矿床的研究现状，建材地质，第 1 期，第 1—16 页。

本文 1988 年 12 月收到，1989 年 2 月改回，郝梓国编辑。

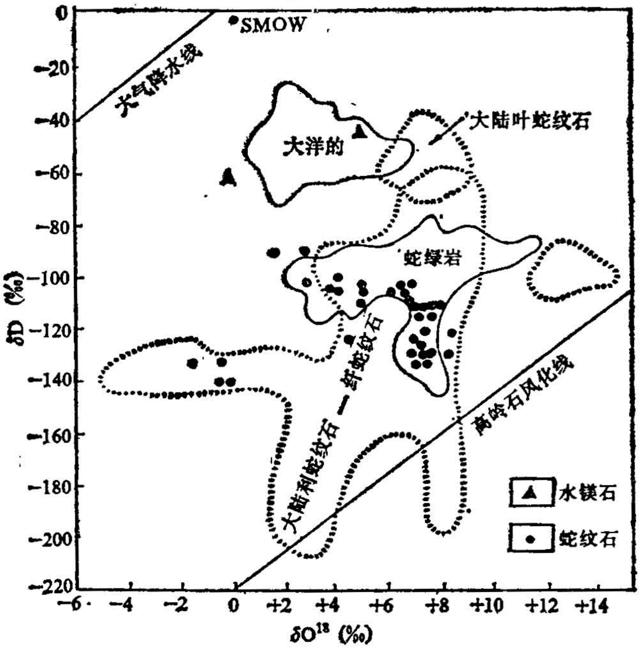


图 1 不同矿床的蛇纹石在 δD—δ18O 图解上的投点

Fig. 1. δD versus δ18O diagram showing the plots of serpentine samples from chief mines

规律。

多数学者认为超镁铁质岩在洋壳环境的蛇纹石化阶段不可能生成温石棉矿床[1]。我们对国内主要温石棉矿床的纤蛇纹石、磁铁矿的氢、氧同位素分析结果，蛇纹石的 δD 值变化在 -84.44—-139.80 之间，与大陆蛇绿岩中蛇纹石的 δD 值变化范围一致；$\delta^{18}O_{Sp}$ 一般变化在 $+2.76$—$+6.58$ 之间，茫崖矿床的 $\delta^{18}O_{Sp}$ 变化在 $+4.36$—$+8.88$ 之间。样品在 δD—$\delta^{18}O$ 图解(图 1) 上的投点，均在大陆型蛇绿岩区内。所换算的 W/R 值的投点情况与大气降水的 W/R 曲线特征一致。显然，这些温石棉矿床的成矿作用发生在大陆环境。根据同位素测温，大量温石棉脉形成的温度变化在大约 200—600℃ 之间1)。成矿温度主要取决于矿床成生的大地构造环境。在三联构造部位生成的矿床(如茫崖)，由于地区热流值高，成矿构造地球化学作用过程复杂，成棉温度一般偏高；赋存在板间带中的矿床(如小八宝)，成棉温度通常偏低。

温石棉是在裂隙空间中生成的一种应力矿物。构造地球化学作用2)，即促进和制约成棉地球化学作用的构造活动，主要是裂隙构造的地球化学效应，是温石棉脉发育，并决定其质量的重要因素。事实上，许多棉脉形态及棉脉组合都显示了含棉裂隙的张性特征。裂隙张开造成压力突然降低，有利于成棉元素从相对高压的围岩蛇纹岩中，向低压的裂隙溶液中迁移，使元素活性增强，发生渗滤交代作用。表 1 所列电子探针分析结果，显示棉

1) 万朴等，1988，我国西北地区超镁铁质岩型纤蛇纹石石棉矿床成矿地球化学作用及远景评价(研究报告)。

2) 涂光炽，1984，构造与地球化学作用，矿物岩石地球化学通讯，第 1 期。

脉与围岩蛇纹岩间的化学组成差别很小。说明到成棉阶段，主要元素已进行了充分迁移、调整，并趋于均匀。成棉元素的供给是靠压力陡度趋动渗滤交代作用而进行的。这与网状结构中心与边缘由于浓度陡度造成的元素扩散迁移形成明显对照。表 2 的数据显示了浓度陡度对元素迁移的制约。辉石中的 Si > Mg，Si 相对易于迁移。所以，在透辉石转变为利蛇纹石绢石过程中，除 H_2O 渐增外，Mg 的相对含量也变大。但 Si 仍多于 Mg；橄榄石中 Mg > Si，Mg 的迁移活度相对增强，但环绕橄榄石残心的利蛇纹石网边的 Mg 仍多于 Si。同时，构造活动产生的热力、化学力对元素迁移及地质化学反应也有重要促进和控制作用。

表 1　榆树沟样品（Y-3.13）的电子探针分析

Table 1　EMP analysis of the samples (Y-3.13) of Yushugou asbestos mine

矿	物	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	FeO	MnO	TiO_2	Cr_2O_3	CoO	NiO	K_2O	Na_2O	总量*
Y	V(c)	0	44.80	0.79	38.93	1.71	0	0.01	0.18	0	0.51	0	0	86.93
|	V(e)	0	44.41	1.23	39.00	1.58	0.09	0.02	0.28	0	0.36	0.02	0	86.99
3	H(w)	0.16	43.39	0.69	39.28	1.39	0.07	0	0.20	0	0.28	0.04	0	85.50
Y	V(c)	0.04	44.47	1.21	38.06	2.36	0.17	0	0.47	0	0.16	0.02	0.05	87.01
|	V(e)	0	43.95	1.40	38.91	2.33	0.16	0.02	0.16	0	0.05	0	0.01	86.99
13	H(w)	0.01	43.77	2.05	38.86	2.10	0.04	0.01	0.04	0	0.09	0.01	0.01	86.99

V——棉脉，c——中心，e——边部，H——围岩(蛇纹岩)，w——脉壁，* 未分析 H_2O。
分析者：成都地质矿产研究所；仪器：日本 JCXA-733 电子探针；分析人：付光学。

表 2　网状结构的电子探针分析（Y-3、4）

Table 2　EMP analysis of the mesh texture (Y-3、4)

矿	物	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	FeO	MnO	TiO_2	Cr_2O_3	CoO	NiO	K_2O	Na_2O	总量
Y	D(c)	22.83	56.69	1.72	16.71	1.75	0.05	0.03	0.35	0	0	0.03	0.27	100.43
|	D(e)	22.77	54.33	1.75	15.85	1.43	0.11	0.09	0.33	0	0.19	0	0.41	97.26
3	LB(e)	0.07	43.65	1.59	38.16	2.54	0	0	0.52	0	0.48	0	0	87.01*
Y	O(c)	0.02	42.47	0.01	48.18	8.45	0.18	0.01	0	0	0.34	0	0.03	99.69
|	O(e)	0	40.27	0	47.16	8.73	0.14	0	0	0	0.26	0	0.03	96.59
4	LB(e)	0.09	36.01	0.05	42.09	8.40	0.09	0	0.01	0	0.25	0	0	86.99*

D——透辉石，LB——利蛇纹石绢石，O——橄榄石，* 未分析 H_2O。
分析条件同表 1。

国内、外不少著名温石棉矿床都产在区域性断裂带附近。这些断裂带是大气降水下渗加热并循环返回至超镁铁质岩体的重要通道。与之有关的次级裂隙构造体系及其活动，是容矿构造和促进成棉作用的趋动力。表现了构造条件对棉脉成生的控制作用。

在含棉蛇纹岩体岩石化学特征的多元统计分析中发现，各矿床的Q型聚类分析差异很小，相似系数均大[1)]。表明蛇纹石化过程中，成棉组分都进行过充分调整，各含棉岩体的岩石化学特征已十分相近。蛇纹石假像结构和蛇纹石脉体在含棉岩体内的普遍共存，表明蛇纹石化过程中，岩体内的微观体积不变，但宏观上，在岩体体积发生变化时，有蛇纹石

1）权云秀、彭声谦、万朴，1988，多元统计分析在非金属矿床预测中的应用，全国非金属矿学术会议论文集（一），第 146—150 页。

组分迁出。假设镁橄榄石和顽火辉石中较大的阴离子氧格架维持原状，则 Mg、Si 等阳离子可以在蛇纹石形成过程中发生迁移。Wicks (1979) 用下列反应式表现了这种迁移[2]。电子探针分析也证实了成棉组分的迁移[3]。

$$\underset{F_0}{Mg_2SiO_4} + \underset{En}{MgSiO_3} + 2H_2O \rightarrow 0.78\underset{Sp\ (\text{假像结构})}{[Mg_3Si_2O_5(OH)_4]} + 0.22\underset{Sp\ (\text{迁移})}{[Mg_3Si_2O_5(OH)_4]}$$

成棉元素的迁移和成棉物质的供给，是在前述构造地球化学作用的趋动下进行的。岩体内成棉组分的充分调整，使其岩石化学状况趋近于标准蛇纹岩的特征，即达到成棉临界状况，其主要岩石化学标志是：$m/f = 10—20$，m/s 值约 1.65，MgO/SiO_2 值在 0.99—1.02 之间，H（氧化系数）= 56—75。如果环境温度为 200—400℃，压力为 2×10^5 KPa 左右，半开放体系，有水分压高的热液活动，则可能生成温石棉矿床。

但是，超镁铁质岩的蛇纹石化作用是复杂的，有明显的不均匀性和多期性特征。由于成矿物理化学条件的变化，尤其是成矿温度的差异，不仅造成不同矿床的蛇纹石结构特征及矿物组合的殊异，也导致元素类质同象替换程度的明显差别，从而出现不同类型矿床的蛇纹石及温石棉在化学组成，尤其是 Fe、Al 等杂质元素含量上的规律性变化。表 3 展示出，随成棉温度增高，SiO_2 及 Fe、Al 等杂质成分增加，MgO 含量减少的趋势。同时，纤蛇纹石晶胞参数值也随成分不同而变化。回归分析证实，晶胞参数值受 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、FeO 及 H_2O 含量的影响。

表 3 不同产地纤蛇纹石的化学成分及晶胞参数值

Table 3 Chemical compositions and cell parameters of chrysotiles from different mines

样品产地	成棉温度(℃)	SiO_2	MgO	FeO	Al_2O_3	Fe_2O_3	H_2O^+	纤蛇纹石晶胞参数值			
								a_0(Å)	b_0(Å)	c_0(Å)	β
小八宝	239—271	41.58	42.15	0.41	0.40	1.18	14.05	5.29	9.20	14.65	93.07
双岔沟	229—246	41.61	42.03	0.07	0.35	1.07	13.06	5.29	9.20	14.65	93.02
小黑刺沟	288	41.95	40.02	0.06	1.14	2.61	13.43	5.30	9.23	14.66	92.89
茫崖	436—579	42.67	40.28	0.47	0.75	1.75	13.27	5.37	9.22	14.66	93.22

分析者：四川建筑材料工业学院；仪器：日本 D/max—IIIA X 射线衍射仪；分析人：彭同江。

不同矿床所产温石棉的晶体化学特征差异又导致了温石棉纤维性能的变化。含 Fe、Al 高者，为硬直型纤维，其抗张强度保持较好，而分散成浆性能很差；成分较纯者，呈柔软型纤维，具优良分散成浆性能。

介质条件也是成棉的重要因素之一。在整个蛇纹石化过程中，介质条件是有变化的。我们对大量温石棉矿床的矿床矿物学及地球化学研究[1)]表明，初期蛇纹石化是在还原条件及酸性溶液作用下进行的；主要成棉期则发生在弱氧化环境的弱碱—碱性介质中；后期叶蛇纹石化阶段又转变为局部还原状况的中—弱酸性介质条件。Kretschmar 等(1982)指出，在氧化条件下的含 CO_2 流体可使蛇纹岩发生滑石-菱镁矿化。Johannes (1969) 认为，在 5×10^7 Pa 和大约 450℃ 条件下，含 CO_2 20—80 mole% 的热液交代超镁铁质岩

1) 万朴等，1988，我国西北地区超镁铁质岩型纤蛇纹石石棉矿床成矿地球化学作用及远景评价(研究报告)。

可生成滑石[4]。大量野外观察已验证了上述论点。因此，富 CO_2 溶液或富硅及含 CO_2 热液作用，均不利于生成温石棉矿床。

综合我国各主要矿床的地质特征及成矿条件，以及国外一些典型矿床实例，可将超镁铁质岩型温石棉矿床分为三联构造部位的多期改造型(茫崖型)，板间带中相对活动地段的改造型(双岔沟-小黑刺沟型)和板间带中相对稳定地段的简单型(小八宝型)等 3 种亚类1)。这 3 种亚类型除反映了矿田、矿床构造、叠加蚀变作用等宏观矿床地质特征的差异外，主要体现在由成矿条件的差异而引起的蛇纹岩结构、构造，矿物组合，纤蛇纹石石棉纤维晶体化学及性能特征等微观方面的差别。

譬如，小八宝矿床赋存在祁连山托勒山加里东褶皱带东南段 O_3 蛇绿岩建造中，O_3 蛇绿岩侵位后，北祁连褶皱带逐渐趋向稳定。小八宝含棉岩体基本上只经历了成棉期前的蛇纹石化及成棉期蛇纹石化两次演化，后期叠加蛇纹石化及其它蚀变作用不太强烈。因而蛇纹石假像结构的发育和保存均很好，成棉温度较低(239.54—271.99℃)，矿物组合较简单，石棉纤维发育良好，柔软、质纯，成浆性能好；与小八宝矿床差别很大的是位于塔里木板块、西藏板块、柴达木板块(断块)接合部位，即三联构造部位的茫崖石棉矿床，区域构造活动频繁，成棉作用过程复杂，温度较高(436—579℃)。含棉岩体经历过 3 期蛇纹石化作用，其中，成棉期后叠加的叶蛇纹石化作用强烈。其它的叠加蚀变作用(如滑石—菱镁矿化)强烈。石棉纤维的 Fe、Al 杂质含量较高，经受过后期改造，纤维成浆性差，但矿床规模巨大。上述两种亚类型矿床的差别显然受大地构造背景制约。属于小八宝型的温石棉矿床，国内外均不乏其例，著名的魁北克温石棉矿床即属这一亚类。而茫崖型矿床目前发现不多。介于两者间的双岔沟-小黑刺沟型即过渡型矿床是大量存在的。这 3 种亚类型矿床的主要特征如表 4 所示。

表 4　3 种亚类型温石棉矿床特征简表

Table 4　The characters of three subtypes of chrysotile asbestos deposits

特征 类型	母岩体岩石化学特征	矿物组合及结构	围岩蚀变	成棉温度(℃)	矿床规模纤维特性
茫崖型	斜辉辉橄岩 m/f = 9.5(平均值，下同)m/s = 1.65，H = 56，MgO/SiO_2 = 0.99	Ant.，Liz.，Chry.，Tal.，Ma. 等。主要为叶片穿插结构等非假像结构[5]。	叶蛇纹石化发育。滑石化，菱镁矿化。	420—580	规模巨大 成浆性差
双岔沟小黑刺沟型	斜辉辉橄岩、斜辉橄榄岩、纯橄岩，m/f = 17，m/s = 1.62，H = 75，MgO/SiO_2 = 1.01	Liz.，Chry.，Ant.，Ma.，tal.，等。假像结构和非假像结构均常见	叶蛇纹石化常见。滑石-菱镁矿化也发育	250—420±	大、中、小型成浆性随矿床而异
小八宝型	斜辉辉橄岩、纯橄岩。m/f = 20，m/s = 1.64，H = 68，MgO/SiO_2 = 1.02	Liz.，Chry.，Ma. 等。典型假像结构	蛇纹石化(利蛇纹石、纤蛇纹石)，碳酸盐化	250±	大、中型成浆性好

Ant. 叶蛇纹石，Liz. 利蛇纹石，Chry. 纤蛇纹石，Tal. 滑石、Ma. 磁铁矿。

二、超镁铁质岩型温石棉矿床成矿模式

温石棉矿床的成生，是一个长期缓进的地质作用过程。尽管迄今还没有地质年龄数

1) 万朴，1988，我国西北地区温石棉矿床类型及其研究意义，全国非金属矿学术会议论文集(一)，第126—129页。

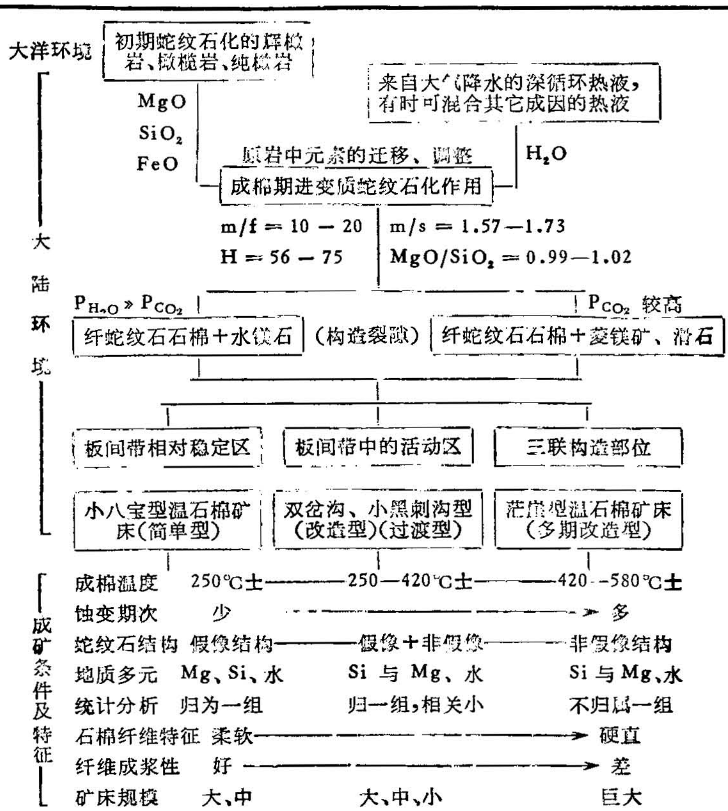
据说明由蛇绿岩建造的产生到温石棉矿床形成之间有多长的时间间隔。但是，蛇绿岩侵位过程，侵位后的地质事件造成的多次构造活动及相伴生的热液蚀变，广泛的多期的蛇纹石化作用，直至形成温石棉矿床，这一复杂过程本身已反映了漫长的地质历史。温石棉脉不同于那些在局限的成矿裂隙地带发生热液蚀变并伴之发生有用组分或有用矿物聚集而形成的矿脉；温石棉脉是在整个母岩体几乎全部蛇纹石化的基础上，发生叠加蛇纹石化作用，通常是在较稳定的地质环境中，在升温条件下缓慢进行的交代作用，才能产生温石棉脉体群并造成工业规模的聚集。温石棉矿床中普遍出现的沙钟结构，反映了这种稳定缓进的蛇纹石化作用特征。

超镁铁质岩在水的参与下经历长期蚀变演化过程中，滞留在蛇纹岩裂隙中的热液，演化为饱和蛇纹石组分的成棉溶液，在成矿期的裂隙构造体系的应力作用下，生长发育纤蛇纹石石棉脉体。矿物组合与热液性质有关。水分压高的成棉热液可生成纤蛇纹石（石棉）、磁铁矿、水镁石组合；成棉热液中 CO_2 分压较高时，则产生纤蛇纹石（石棉）、磁铁矿、菱镁矿等碳酸盐矿物和滑石等矿物组合。利于温石棉脉大量发育的环境，通常是压力为数千巴，温度为 200 至 600℃，热液活动发育的中浅成、半开放的地质环境。

因此，作者认为，超镁铁质岩型温石棉矿床的成矿模式可以表 5 的形式表现．同时可

表 5 超镁铁质岩型温石棉矿床成矿模式

Table 5. The minerogenetic model of chrysotile asbestos deposits in the ultramafic rocks



简述为：蛇绿岩建造中的超镁铁质岩型温石棉矿床，是在板块聚合之后的大陆蛇纹石化环境，在大气降水来源的深循环热水为主的多期热液蚀变过程中，尤其是在叠加进变质蛇纹石化作用过程中，使岩体达到成棉临界状况，成棉溶液在有利的裂隙构造体系中，发生交代-充填结晶作用而形成的。由于大地构造背景和成矿地球化学作用特征的不同，可形成不同亚类温石棉矿床。

三、讨　论

本文论述的这一成矿模式是与我国许多重要温石棉矿床的勘探实践相吻合的. 温石棉是优良的隔热、保温节能、增强纤维材料，在国民经济各个领域有着广阔的应用前景。这一成矿模式对温石棉的找矿、勘探及开发应用都有指导意义。

1. 温石棉矿床的分布与板块的聚合及演化关系密切，有明显的规律性。陶维屏(1988)把温石棉划归形成于地缝合线附近的重要非金属矿床之一[6]。在区域性预测的宏观部署上，可根据大地构造背景条件，找寻不同亚类的温石棉矿床。

2. 在部署矿床地质勘探工作上，蛇纹石化特征，矿物组合，蛇纹石结构，含棉裂隙构造的研究十分重要，可为成矿作用，矿化特征的研究提供重要信息. 是探索棉脉分布规律，圈定有利矿化地段的必要基础工作。

3. 对叠加构造地球化学作用及蛇纹石矿物学、纤蛇纹石石棉矿物学和晶体化学的深入研究，不仅加深了温石棉成因的认识，而且揭示了温石棉的质量及性能与成矿构造地球化学作用及蛇纹石矿物晶体化学特征之间的规律性关系。这对温石棉矿床评价和安全开发利用温石棉资源都是十分重要的。

彭同江、李和玉等同志在本文研究过程中也作过部分工作，谨此致谢。

参　考　文　献

[1] Riordon, P. H., 1981, Geology of Asbestos Deposits.

[2] Wicks, F. J., 1979, Mineralogy, Chemistry and Crystallog raphy of Chrysotile, Short Course Handbook, Vol.4, Mineralogical Association of Canada, pp. 35—72.

[3] 万朴、李和玉、史定一，1988，四川石棉县石棉矿床的蛇纹石化及成矿地球化学作用，矿物岩石，第 8 卷，第 2 期，第 112—119 页。

[4] Ulrich Kretschmar, Dianne Kretschmar, 1982, Talc, Magnesite and Asbestos Deposits in the Kirkland lake——Timmins Area, Ontario Geological Survey Open File Report 5391, Ministry of Natural Resources, Canada, pp. 83—125.

[5] Wicks, F. J., Whittaker, E. J. W., 1977, Serpentine Textures and Serpentinization, Can. Mineral. Vol. 15, pp. 458—488.

[6] 陶维屏，1988，中国非金属矿床形成和分布的若干规律——中国的非金属矿床和板块构造，地质学报，第 62 卷，第 2 期，第 143—154 页。

THE MINEROGENETIC MODEL OF CHRYSOTILE ASBESTOS DEPOSITS IN ULTRAMAFIC ROCKS

Wan Pu

(Sichuan Institute of Building Materials, Mianyang City, Sichuan)

Abstract

Most of the chrysotile asbestos deposits occur in ultramafic rocks related to ophiolites. These types of chrysotile asbestos deposits were formed during the proccess of serpentinization in continental conditions after the convergence of palaeo-plates. It is clear that the metasomatism and filling-crystalization of hydrothermal solutions from heated underground water, which originated as meteoric water, formed chrysotile asbestos veins.

The critical state for asbestos formation in ultramafic rock bodies might be reached by superimposition of multiple stages of serpentinization. The development of a favourable fracture system and the existence of a relatively stable environment are important conditions for forming chrysotile asbestos deposits.

Three subtypes of chrysotile asbestos deposits could be formed in different tectonic backgrounds and under different conditions of minerogenetic geochemical processes.

作 者 简 介

万朴，生于 1936 年，1957 年毕业于北京地质学院金属及非金属矿产地质勘查专业，现任四川建筑材料工业学院教授、副院长，长期从事非金属矿床成因及非金属矿产开发应用研究。通迅地址：四川省绵阳市四川建筑材料学院。