

新疆阿克苏前寒武纪蓝片岩地体中 迪尔闪石的发现及其地质意义*

张立飞 姜文波 魏春景 董申保

(北京大学地质学系, 北京 100871)

摘要 在新疆阿克苏前寒武纪蓝片岩相变质的磁铁石英岩夹层中发现了迪尔闪石 ($\text{Fe}_{12}^{2+}\text{Fe}_6^{3+}\text{Si}_{12}\text{O}_{40}(\text{OH})_{10}$), 其共生的矿物组合为 (i) 迪尔闪石 + 钠闪石 + 黑硬绿泥石 + 黑柱石 + 磁铁矿 + 石英; (ii) 迪尔闪石 + 黑硬绿泥石 + 磁铁矿 + 石英. 矿物化学成分分析和共生矿物组合表明阿克苏的迪尔闪石为贫 Mn 型的迪尔闪石, 与 Alps 的迪尔闪石相似, 但比 Alps 迪尔闪石更接近纯端元组分. 根据迪尔闪石稳定 P - T 条件, 阿克苏迪尔闪石的形成条件为压力大于 1.0 GPa, 温度 300~400°C, 地热梯度在 10°C/km 左右.

关键词 迪尔闪石 地热梯度 前寒武纪蓝片岩 新疆阿克苏

迪尔闪石也称迪闪石 (deerite), 是一种形成于低温高压条件下的含水富铁硅酸岩矿物, 其理想分子式为 $\text{Fe}_{12}^{2+}\text{Fe}_6^{3+}\text{Si}_{12}\text{O}_{40}(\text{OH})_{10}$. 迪尔闪石最早是由 Agrell 等人^[1]在美国 Franciscan 杂岩中发现. 后来相继在 New Caledonia^[2], 土耳其的 Eskisehir^[3], 希腊的 Sifnos^[4], 法国的 Corsica 岛^[5]等二十几个地区的蓝片岩相变质岩石中发现. 但这些高压变质岩石都是显生宙以来形成的, 至今尚没有在前寒武纪岩石中发现.

本文报道了在新疆阿克苏前寒武纪蓝片岩的富铁石英岩夹层中发现的迪尔闪石, 这是目前世界上发现的唯一的前寒武纪迪尔闪石; 并讨论了其矿物学特征、形成的 P - T 条件和可能的地质意义.

1 地质产状及岩石学特征

新疆阿克苏蓝片岩位于新疆阿克苏市西南约 20 km 处, 岩层呈北东-南西方向分布, 宽约 20 km, 长约 40 km, 在其南端为震旦系上统苏盖特布拉克组和奇格布拉克组的红色长石砂岩不整合覆盖 (图 1). 在震旦系上统底砾岩中有白云母片岩和穿切了蓝片岩而被震旦系地层覆盖的没有经受高压变质的基性岩脉, 因此阿克苏蓝片岩是迄今为止世界上所发现的最典型的前寒武纪蓝片岩^[6,7]. 阿克苏蓝片岩的变质年龄为 700~800 Ma (多硅白云母 K-Ar 和全岩 Rb-Sr 等时线^[8]; 蓝闪石 $\text{Ar}^{40}/\text{Ar}^{39}$ 坪年龄^[7]).

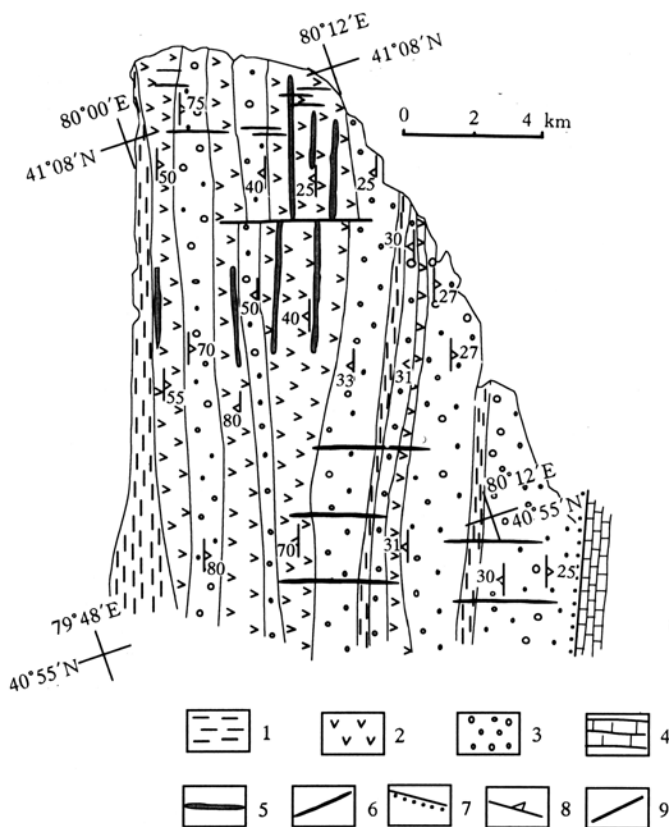


图 1 新疆阿克苏前寒武纪蓝片岩分布地质图

1 示白云母片岩, 2 示变基性火山岩夹基性蓝片岩, 3 示长英质蓝片岩, 4 示震旦纪红色砂岩, 5 示变质磁铁石英岩, 6 示基性岩脉, 7 示不整合, 8 示岩层产状, 9 示断层

阿克苏蓝片岩相变质岩石主要是由基性蓝片岩、长英质蓝片岩、多硅白云母片岩和变质磁铁石英岩等所组成, 岩层呈北东-南西方向分布(图 1), 褶皱变形强烈。迪尔闪石就出现在基性蓝片岩夹层中的薄层状磁铁石英岩中, 磁铁石英岩层厚十几厘米到几十厘米, 延续稳定, 个别地段由于挤压变形呈透镜体形式出现。

2 矿物学特征

含迪尔闪石的变质磁铁石英岩的主要矿物共生组合有:(i)迪尔闪石+钠闪石+黑硬绿泥石+黑柱石+磁铁矿+石英;(ii)迪尔闪石+黑硬绿泥石+磁铁矿+石英。

2.1 迪尔闪石

暗黑褐色, 针柱状, 横断面为菱形或六边形。具弱的多色性, N_g = 暗褐色, N_p = 深黑色, 具一组完好的 $\{110\}$ 解理。迪尔闪石多呈束状或集合体形式出现(如图 2(a)所示)。颗粒长度变化于 0.02~1 mm, 平行于片理化方向分布。其矿物成分如表 1 所示, 阿克苏的迪尔闪石成分较单一, 几乎接近其端元组分, Fe^{2+} 变化于 11.71~11.80 之间, 在 Fe^{2+} - Mn^{2+} - Mg^{2+} 三角图中阿克苏迪尔闪石几乎落入纯的 Fe^{2+} 端元, 与 Alps 所发现的迪尔闪石相近(图 3(a)); Fe^{3+} 变

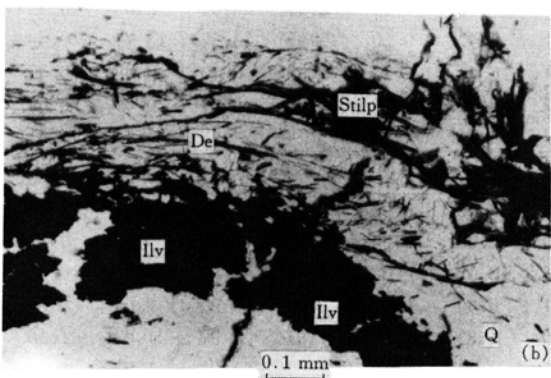
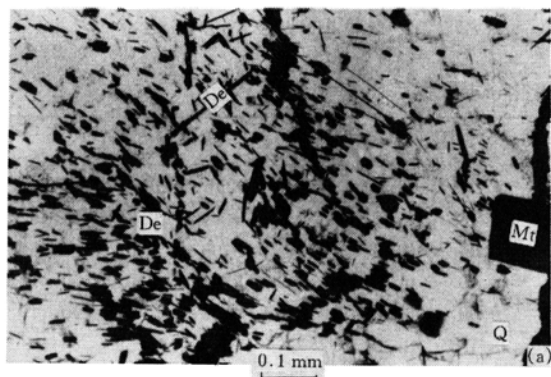


图2 阿克苏蓝片岩相含迪尔闪石的变质磁铁石英岩显微照片

(a) 针柱状迪尔闪石定向分布, 与磁铁矿共生; (b) 针柱状迪尔闪石沿片理方向分布, 与黑柱石、黑硬绿泥石等共生

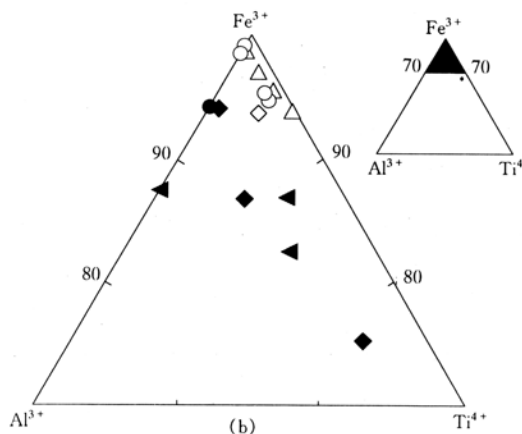
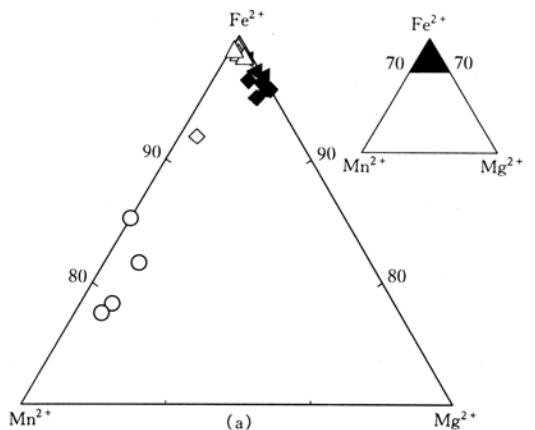


图3 迪尔闪石的 Fe^{2+} - Mn^{2+} - Mg^{2+} 组分图(a) 和 Fe^{3+} - Al^{3+} - Ti^{4+} 组分图(b)

▲示西 Alps^[9], ○示美国 Franciscan 杂岩^[3], ●示希腊 Sifnos^[3], ◆示法国 Ile de Groix, Brittany^[5], ◇示法国 Corsica 岛^[5], △示阿克苏迪尔闪石

化于 5.38~6.13 之间, 在 Fe^{3+} - Al^{3+} - Ti^{4+} 图中, 投在 $\text{Fe}^{3+} > 95\%$ 的区域 (图 3(b)). 其它元素含量都较低, 略含有少量的 Ti^{4+} (0.02~0.34), 而贫 Mn^{2+} (0.04~0.08). Wood^[3] 曾将迪尔闪石分为两类, 一类是富含 Mn 的迪尔闪石, 不与磁铁矿共生, 如美国的 Franciscan 杂岩中的迪尔闪石; 另一类为贫 Mn 的迪尔闪石, 共生组合中有磁铁矿, 如 Alps 所发现的迪尔闪石. 阿克苏迪尔闪石贫 Mn, 含有一定的 Ti^{4+} , 并与磁铁矿共生, 与 Alps 所发现的迪尔闪石相似 (图 3(a)), 但 Alps 迪尔闪石含一定量的 Al 和 Ti (图 3(b)), 这表明阿克苏蓝片岩中的迪尔闪石是目前所报道的最接近端元组分的迪尔闪石, 略含一点 Ti^{4+} 可能是 $\text{Ti}^{4+} + \text{Fe}^{2+} = 2\text{Fe}^{3+}$ 替换的原因.

2.2 黑硬绿泥石(Stilpnomelane)

呈爪状或枝条状与迪尔闪石共生, 具明显红褐色多色性, Ng 为红褐色, Np 为深黄色, 颗粒比较粗, 一般变化于 0.5~2 mm. 与迪尔闪石共生, 平行于片理化方向分布 (如图 2(b)).

其矿物成分分析见表 1, $Mg/(Mg + Fe + Mn)$ 小于 5%, K_2O 变化于 1%~2%, 与 Franciscan 杂岩中的高 Mg 黑硬绿泥石不同, 阿克苏与迪尔闪石共生的黑硬绿泥石属于低 Mg 和低 K 型黑硬绿泥石. Wood^[10] 曾认为低 MgO 而富 FeO 的黑硬绿泥石可能是蓝片岩相的稳定矿物.

表 1 矿物成分电子探针分析数据表

	迪尔闪石				黑硬绿泥石		钠闪石		黑柱石			
	c021a	c021b	c021c	c021d	c021a	c021b	c021a	c021b	c021a	c021b	c021c	c021d
SiO ₂	34.46	33.45	33.62	33.73	43.61	43.79	51.88	51.85	28.83	28.91	29.29	28.36
TiO ₂	0.74	0.41	0.06	1.18	0.04	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.25
Al ₂ O ₃	0.09	0.13	0.13	0.03	4.96	4.90	0.10	0.13	0.06	0.01	0.02	0.00
Cr ₂ O ₃	0.13	0.06	0.00	0.34	0.08	0.05	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.11
FeO ^{a)}	58.51	59.62	60.22	57.32	36.32	36.56	38.13	38.30	52.73	51.72	52.58	51.87
MnO	0.16	0.14	0.11	0.24	0.32	0.34	0.00	0.00	0.11	0.20	0.11	0.23
MgO	0.15	0.07	0.10	0.10	1.01	0.84	0.05	0.04	0.03	0.01	0.03	0.05
CaO	0.05	0.01	0.04	0.18	0.01	0.01	0.47	0.20	13.92	13.52	13.71	13.62
Na ₂ O	0.07	0.05	0.05	0.00	2.05	1.74	6.44	6.74	0.03	0.10	0.09	0.00
K ₂ O	0.09	0.00	0.00	0.13	1.59	1.62	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02
总和	94.45	93.94	94.33	93.25	90.00	89.87	98.96	99.16	95.74	94.48	95.86	94.51
以 45 个氧计算				以 24 个氧计算		以 23 个氧计算		以 8.5 个氧计算				
Si ⁴⁺	12.78	12.76	12.79	12.84	7.91	7.95	8.03	8.02	2.10	2.12	2.12	2.09
Ti ⁴⁺	0.21	0.12	0.02	0.34	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Al ³⁺	0.04	0.06	0.06	0.01	1.06	1.05	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr ³⁺	0.04	0.02	0.00	0.10	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Fe ^{3+ b)}	5.38	5.98	6.13	5.41	0.00	0.00	1.83	1.86	1.07	1.02	1.02	1.10
Fe ²⁺	11.90	11.76	11.71	11.77	5.51	5.55	3.11	3.10	1.93	1.97	1.97	1.90
Mn ²⁺	0.05	0.05	0.04	0.08	0.05	0.05	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg ²⁺	0.09	0.04	0.06	0.06	0.27	0.23	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca ²⁺	0.02	0.00	0.02	0.07	0.00	0.00	0.05	0.02	1.08	1.06	1.06	1.07
Na ⁺	0.05	0.04	0.04	0.00	0.72	0.61	1.93	2.02	0.00	0.01	0.01	0.00
K ⁺	0.04	0.00	0.00	0.06	0.37	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
阳离子数	30.60	30.82	30.85	30.74	15.91	15.83	14.98	15.05	6.18	6.18	6.18	6.18

a) 全铁, b) 根据电价平衡计算^[11]. 矿物成分由中国科学院地质研究所测定

2.3 黑柱石(Ilvaite)

黑柱石在本区也是第一次发现, 呈黑褐色, 它形或不规则状出现 (图 2(b)). 具明显的多色性, Ng= 黑褐色, Np= 暗绿色, 颗粒较粗, 一般变化于 1~3 mm, 平行片理化方向排列. 其矿物成分如表 1 所示, 阿克苏蓝片岩中的黑柱石成分比较接近于纯端元组分.

2.4 钠闪石(Riebeckite)

钠闪石含量很低, 在薄片中通常作为残留物被包裹在大颗粒的黑柱石中, 具明显的多色性, Ng= 深蓝色, Np= 淡蓝色, 闪石解理明显, 其矿物成分特征如表 1 所示, $Mg/(Mg + Fe^{2+})$ 低于 0.1, 由于 Al 含量极低, 其 $Fe^{3+}/(Fe^{3+} + Ca)$ 接近于 1, 根据 Leake^[11] 的碱性闪石分类, 阿克苏蓝片岩相变质磁铁石英岩中与迪尔闪石共生的钠质闪石属于比较接近纯端元组分的钠闪石.

2.5 磁铁矿

粒状, 薄片中多为正方形断面, 较粗, 粒度变化于 0.2~1 mm. 与迪尔闪石共生(图 2(b)), 成分接近纯端元组分.

3 P - T 条件的确定

有关迪尔闪石形成的 P - T 条件最早由 Langer 等人^[12] 在 2.0~2.5 GPa, 550~600℃ 和 Ni/NiO 作缓冲控制 f_{O_2} 的条件下合成, 并根据在 FeO-Fe₂O₃-SiO₂ 体系中出现迪尔闪石、铁辉石、铁橄榄石、石英相平衡计算和铁辉石在压力低于 1.3 GPa 时分解为铁橄榄石 + 石英反应的实验研究, 外推至较低的压力和温度, 确定出迪尔闪石的 P - T 区间. 后来, Wood^[3] 在进行美国 Franciscan 的迪尔闪石研究中, 认为 Langer 等人^[12] 高压下合成迪尔闪石的实验结果外推至低的压力和温度下是有问题的, 在较低的温度和压力条件下出现的矿物组合应该是迪尔闪石与铁闪石(Gru)、铁滑石(Min)、铁蛇纹石(Gre)磁铁矿(Mt)和石英等共生, 因为当时没有这些矿物的实验热力学数据, Wood^[3] 只是依据矿物的分子体积变化大致确定在这一组合中迪尔闪石稳定的 P - T 条件为大于 0.5 GPa 和低于 350℃, 与硬柱石的 P - T 区间是一致的. 近来 Lattard 和 Breton^[13] 根据迪尔闪石的最新实验热力学数据, 其它矿物利用 Berman 内部一致性热力学数据, 对 Wood^[3] 提出的出现迪尔闪石与铁闪石、铁滑石、铁蛇纹石、磁铁矿和石英等共生矿物平衡体系进行了重新计算, 得出结论: 纯端元迪尔闪石矿物形成的压力在 1.0 GPa 以上, 地热梯度低于 10℃/km, 其 f_{O_2} 与磁铁矿共生的窄的氧逸度条件(图 4).

如前所述, 阿克苏迪尔闪石成分单一, 接近于纯的端元组分, 并且与磁铁矿共生, 而没有出现铁闪石、铁滑石、铁蛇纹石和赤铁矿等矿物, 其形成的压力不

会低于 1.0 GPa, 而温度变化于 300~400℃ (蓝闪绿片岩相, 董申保^[6]; Liou 等^[7]), 其 P - T 条件与 Alps 和 Corsica 岛的迪尔闪石形成条件相近(图 4). 地热梯度变化于 10℃/km 左右, 与目前世界上所报道的其它地区迪尔闪石的地热梯度也是大致相同的(图 4).

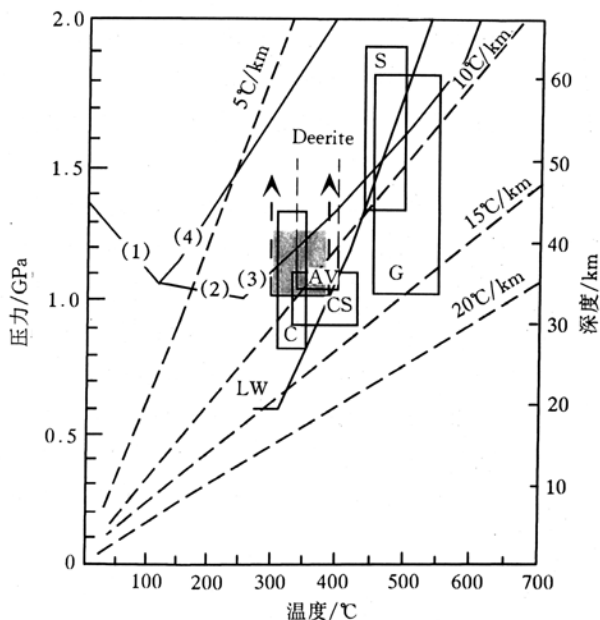


图 4 阿克苏迪尔闪石的稳定 P - T 条件

(1) $De + 2.30H_2O = 2.45Gre + 3Hem + 1.71Min$; (2) $De = 3Min + 3Mag + 4/5H_2O$; (3) $De = 9/7Gru + 3Mag + 12/7Qtz + 26/7H_2O$; (4) $De + 9Hem = 12Mag + 12Qtz + 5H_2O$ ^[13]. S 为 Sifnos 迪尔闪石的 P - T 区间^[4]; G 为 Ile de Groix, Brittany^[5], C 为 Corsica^[5]; AV 为 Vanoise, French Alps^[14]; CS 为 Shuksan Unit^[15], 阴影部分为本文阿克苏迪尔闪石 P - T 区间; LW 为硬柱石稳定区间^[16]

4 结论和讨论

直到目前为止,已在世界 20 多个地区发现了迪尔闪石. 它们主要集中出现在几个典型的高压变质带中,如美国西部 Franciscan 杂岩(Wood,^[3,10])、希腊的 Sifnos^[4], New Caledonia^[5]和西 Alps^[9]等. 它们都是显生宙以来形成的高压变质带,并且都经历了硬玉或硬柱石蓝片岩相变质作用(地热梯度小于 $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$,如图 4 所示). 阿克苏的迪尔闪石是目前世界上所报道的唯一的寒武纪迪尔闪石($700\sim 800\text{ Ma BP}$).

通常认为前寒武纪高的地热梯度不会出现高压相系变质岩石(地热梯度 $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$). De Rovere^[17]最早注意到硬柱石等高压低温变质矿物在前寒武纪岩石中没有发现,而在显生宙以来的高压变质带中是较常见的,提出了地球自前寒武纪以来在逐渐变冷的观点. 后来 Ernst^[18]在总结蓝片岩带的时空分布时发现含硬玉(Jd)的蓝片岩只出现在白垩纪之后的高压变质岩石中,认为中生代之后地热梯度才明显降低. Maruyama 等人^[19]发现中亚的几条含硬玉的蓝片岩带的年龄为 $400\sim 500\text{ Ma}$,认为地热梯度变低可上推至古生代. 阿克苏前寒武纪蓝片岩相变质磁铁石英岩中迪尔闪石的发现说明在晚元古代地热梯度就已经开始降低,出现了与显生宙以来冷的板块体制一致的高压低温(地热梯度 $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$)构造环境,这说明地球并不是从古生代以来逐渐变冷的,至少在晚元古代就已经开始变冷.

阿克苏蓝片岩通常被认为是中朝-塔里木板块和哈萨克斯坦板块间俯冲发生高压变质形成的(Liou 等人^[7],肖序常等人^[20]). 虽然现在越来越多的证据表明晚元古代板块构造机制和显生宙以来的板块机制相同,但这主要是根据目前所发现的元古代蛇绿岩来确定的. Moor^[21]认为这是由于在晚元古代($1\ 000\text{ Ma BP}$ 之后)洋壳厚度开始变薄的缘故. 阿克苏蓝片岩相变质磁铁石英岩中迪尔闪石的发现进一步证明至少在晚元古代,现今的板块构造体制就出现了:板块俯冲发生高压变质,然后快速折返使得高压相系的变质岩石($10^{\circ}\text{C}/\text{km}$)得以保存. 晚元古代($700\sim 800\text{ Ma BP}$)可能是地球演化过程中重要的转折阶段.

致谢 感谢中国科学院地质研究所岩石圈开放实验室徐平先生和韩秀玲女士帮助进行矿物成分的电子探针测试;沈其韩院士认真审阅了全文,并提出宝贵的修改意见. 在野外工作过程中,得到过原新疆地质矿产局陈哲夫局长、熊纪斌高级工程师、宋志齐所长和北京大学韩宝福博士的帮助;吴福元教授、王式光教授、阎月华研究员帮助收集部分资料,在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- 1 Agrell S O, Bown M G, McKie D. Deerite, howieite and zussmanite, three new minerals from the Franciscan of the Laytonville district, Mendocino Co, California. *Am Mineral*, 1965, 50: 278
- 2 Black P M. Mineralogy of the New Caledonian metamorphic rocks, II. Amphiboles from the Ouegoa district. *Contrib Mineral Petrol*, 1973, 39: 55~64
- 3 Wood R M. The iron-rich blueschist facies minerals: I. Deerite. *Mineral Mag*, 1979, 43: 251~259
- 4 Schliestedt M. Preliminary note on deerite from high pressure metamorphic rocks of Sifnos, Greece. *Contrib Mineral Petrol*, 1978, 66: 105~107

- 5 Vernie P, Kienast J R, Mevel C. The occurrence of deerite in highly oxidizing conditions within the 'schiste lustrés' of eastern Corsica. *J Metamorphic Geol*, 1986, 4: 385~399
- 6 董申保. 中国蓝闪石片岩带的一般特征及分布. *地质学报*, 1989, 6: 273~284
- 7 Liou J G, Graham S A, Maruyama S, et al. Characteristics and tectonic significance of the Late Proterozoic Aksu blueschists and diabasic dikes, Northwest Xinjiang, China. *International Geological Review*, 1996, 38: 228~244
- 8 Nakajima T, Maruyama S, Uchiumi S, et al. The age of the oldest blueschist of the world—the Aksu Group of Western China. *Nature*, 1991, 346: 263~265
- 9 Boquet J, Forette M C. Sur une deerite de l'ensemble des caleschiste piemontais, a Tronca. *Bulletin de la Societe Francaise de Mineralogie Cristallographie*, 1973, 96: 314~316
- 10 Wood R M. The Laytonville Quarry (Mendocino County California) exotic block: iron-rich blueschist-facies subduction-zone metamorphism. *Mineral Mag*, 1982, 45: 87~99
- 11 Leake B E. Nomenclature of amphiboles. *The Canadian Mineralogist*, 1978, 16: 501~520
- 12 Langer K, Lattard D, Schreyer W. Synthesis and stability of deerite, $\text{Fe}_{12}^{2+}\text{Fe}_6^{3+}\text{Si}_{12}\text{O}_{40}(\text{OH})_{10}$ and $\text{Fe}^{3+} = \text{Al}^{3+}$ substitutions at 15~28 kb. *Contrib Mineral Petrol*, 1977, 60: 271~297
- 13 Lattard D, Breton N. The P - T - F_{O_2} stability of deerite, $\text{Fe}_{12}^{2+}\text{Fe}_6^{3+}\text{Si}_{12}\text{O}_{40}(\text{OH})_{10}$. *Contrib Mineral Petrol*, 1994, 115: 308~321
- 14 Goffe B, Veldte B. Contrasted metamorphic evolutions in thrust cover units of the Briançonnais zone(France Alps): a model for the conservation of HP-LT metamorphic mineral assemblages. *EPSL*, 1984, 68: 351~360
- 15 Brown E H. Geology of the Shuksan Suit, Northe Caste Washington, U S A. *Geol Soc Am Mem*, 1986, 164: 143~154
- 16 Chatterjee N D, Johannes W, Leistner, H. The system $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$: new phase equilibrium data, some calculation relations, and their petrological applications. *Contrib Mineral Petrol*, 1984, 88: 1~13
- 17 De Rovere. Some differences between post-Paleozoic and older regional metamorphism. *Geol Mijnbouw*, 1956, 18: 123~127
- 18 Ernst W G. Occurrence and mineralogic evolution of blueschist belts with time. *Am J Sci*, 1972, 272: 657~668
- 19 Maruyama S, Cho M, Liou J G. Experimental investigations of blueschists-greenschist transition equilibria and their petrological applications. *Geol Soc Amer Memoir*, 1986, 164: 1~16
- 20 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京:地质出版社, 1992. 48~52
- 21 Moor E M. Neoproterozoic oceanic crustal thinning, emergence of continents, and origin of the Phanerozoic ecosystem: A model. *Geology*, 1993, 21: 5~8