

经济地质

80 卷 第八 期

美国

ECONOMIC GEOLOGY

and

the Bulletin of the Society of Economic Geologists

1985

(十二月)

地 质 出 版 社

目 录

加利福尼亚西沙斯塔地区块状硫化物矿床专辑绪言.....	John P. Albers (1)
加利福尼亚州西沙斯塔矿区的区域环境和地质新知.....	John P. Albers John H. C. Bain (5)
加利福尼亚西沙斯塔地区Iron Mountain Cluster Brick Flat块状硫化矿床地质.....	John P. Albers (21)
根据岛弧火山岩有关的岩石学和地球化学特征推论东克拉马斯 (Klamath) 山脉 (北部加利福尼亚) 早泥盆世黑矿型硫化物矿床的地球动力学背景.....	H. Lapierre, B. Cabanis, C. Coulon, M. Brouxel和F. Albarede (29)
加利福尼亚州西沙斯塔地区块状硫化物矿石的矿物成分、结构和相对年龄关系.....	Stephen S. Howe (40)
加利福尼亚西沙斯塔Cu-Zn区某些围岩和矿石矿物的Rb-Sr、Sm-Nd、U-Pb和K-Ar的初步研究.....	R. W. Kistler, E. H. McKee, K. Futa, Z. E. Peterman, R. E. Zartman (51)
加利福尼亚东Klamath山脉西沙斯塔矿区的矿液通道构造.....	B. R. Doe, M. H. Delevaux and J. P. Albers (58)
加利福尼亚西沙斯塔地区热液蚀变和块状硫化物矿床的区域稳定同位素分馏系列.....	B. E. Taylor 和 B. C. Soudy (69)
西沙斯塔变火山岩的稀土元素分馏系列——岩石成因及热液蚀变.....	A. E. Bence和B. E. Taylor (82)
加利福尼亚西沙斯塔区Iron Mountain矿的稳定同位素地球化学和金属分带.....	Bernard C. South, Bruce E. Taylor (94)
加利福尼亚州西沙斯塔地区浸染状硫化物、磁铁矿和块状硫化物中的痕量元素.....	T. Botinelly, D. F. Siems和 R. F. Sanzolone(111)
西沙斯塔块状硫化物区四个矿山铁帽的痕量元素含量.....	R. F. Sanzolone和 J. A. Domenico(121)
西沙斯塔铜锌矿地区块状硫化矿及其围岩的地球物理电测研究.....	R. J. Horton, B. D. Smith, J. C. Washburne(126)
西沙斯塔铁帽的近红外光谱及其与澳大利亚和沙特阿拉伯真假铁帽的比较.....	G. L. Raines, L. G. McGee, S. J. Sutley(140)
加利福尼亚州西沙斯塔地区块状硫化物矿床的火山成因解释.....	Paul A. Lindberg(149)

加利福尼亚西沙斯塔地区块状硫化物矿床专辑

绪 言

John P. Albers

加利福尼亚 Klamath 山的东部西沙斯塔铜-锌地区火山成因的块状硫化物矿床是廿世纪早期该州生产铜的主要基地。加利福尼亚州生产的铜约54%曾来自这个地区。二十年代中期,由于不利的价规和环境问题,该地区的大多数矿山被迫停产,不过地区南部的 Iron Mountain 矿床则属例外,该矿床自 1895 年一直开采到 1962 年。1930 年以前 Iron Mountain 矿床产出铜和硫,1929 年—1942 年之间从铁帽中生产金和银,第二次世界大战期间及战后短期内生产铜和锌,1962 年以前则生产炼硫用的块状黄铁矿。这一地区的几乎所有矿床都留有未开采的块状硫化物,并且有多达 25 Mt 的未被开采的硫化物可能仍然储存在地下。

Diller (1906) 和 Graton (1909) 是这一地区最早的地质研究者。Diller 的主要业绩在区域地质,他命名并首次描述了该地区的大多数地层,其中包括含块状硫化物矿床的主岩 Balaklala 流纹岩。另一方面,Graton 对矿床特别有兴趣,他的研究目的在于了解矿床成因。

四十年代末期,美国地质调查所研究了这一地区的地质,测制了 1:24000 比例尺的地质图,并且以 285 号专辑的名义出版了综合性报告 (Kinkel 等 1956)。这份报告和图件乃是本次研究的基本地质资料来源。Kinkel 等人 (1956) 与 Graton (1909) 所得的结论相反,认为 Balaklala 流纹岩是喷出的而不是侵入的,他们根据岩石学把地层划分为下、中、上三个单元。还认为,这一地区的所有块状硫化物几乎都是赋存在 Balaklala 中部单元中的层控矿床,并推断这些矿床大部份为交代成因,因而是后生的。自 285 号专集出版以来,人们充分地研究了世界上许多地区的块状硫化物矿床,并形成了该类矿床成因的新概念。现在的证据使人相信,几乎所有这类矿床都是火山成因,实际上是围岩同时形成的。现在看来似乎很清楚 West Shasta 的大部份矿床是与围岩 Balaklala 流纹岩同时形成的,尽管在沉积过程中交代曾起过一点作用。

本次对西沙斯塔地区研究是 1979 年计划的,它是

在 Bruce R. Doe 主席主持下,在 Denver 地区召集的块状硫化物专题讨论会的一个产物。该会议的一个目的是要在美国国内选择一个合适的地区,在该区能进行类似于日本黑矿矿床 (Ohmoto and Skinner 1983) 的地质标志的研究。结果选中了西沙斯塔地区,因为这里有 Kinkel 等人 (1956) 的优秀报告和图件,而且可以利用并直接观察 Iron Mountain 的部份已被开采的块状硫化物大矿体,该矿体已剥去表土,完全裸露,因而可供深入研究。

课题主要任务是:(1) 利用同位素、地球化学和地球物理技术,确定矿床年龄和成因。(2) 复查和重新解释那些说明矿体成因及其展布的地质现象。在野外工作中,参加的科学家们采集了标本、做了地球物理测量、对新的公路剖面 and 露天采场进行了制图,而后者在 Kinkel 等人 (1956) 野外工作时是不可能做的。

为了实现上述两项任务,该课题不但是在美国地质调查所赞助下,作为一项多学科课题予以计划与实施,而且从调查所以外的科学家的协作中也受益很大,包括美国以外的科学家的协作。这方面要感谢 John H. C. Bain, A. E. Beuce, Henriette Lapierre, Paul A. Lindlerg, Bernard C. South 和 Bruce E. Taylor, 他们都为此卷做出了贡献。

在整个野外工作期间, Iron Mountain 矿床的主人们给予了殷切的关照和帮助,允许全部课题参加者自由地无阻碍地进入他们矿山的各个部分,并允许查看已有的记录和岩心。感谢 Iron Mountain 矿矿长 T. W. Arman 和副矿长 Frank Fortev, 公司,给予的良好合作,没有这些合作,这个研究是不能完成的。

这卷论文中的主要发现和结论概述如下:

Albers 和 Bain (1985) 增做了一些新的公路剖面图并重新分析了这一地区的地质,在此基础上,他们得出的主要结论是认为 Kinkel (等人 (1956) 所提的下述观点是正确的,这一地区仅出露了一个主要的绿岩单元——Coley 绿岩,它位于 Balaklala 流纹岩之下,并多少有些与 Balaklala 流纹岩呈指状互层过渡。因

此,认为存在有少量的 Balaklala 流纹岩的中部含矿单元,只不过它隐藏在主矿带东部泥盆纪火山地层之中的这种说法,可靠性很小,甚至在那里隐伏有块状硫化物矿床的可能性也是很小的。然而像 Iron Mountain 和 Mammoth,那样的一、两个矿床群可能会存在于埋藏在 Brgdon 组 沉积盖层之下的硅质火山地层向北延展的部位上。

在 Balaklala 流纹岩喷发和块状硫化物矿化作用期间, West Shasta 地区处于扩张构造状态,做出这一推论的依据是: (1) 有大量北东向的 Balaklala 型岩石的岩脉存在,它们切割了围绕在该地区南边和东边的 Copley 绿岩。(2) 有地堑构造存在,它们伴生有几个块状硫化物矿床群。(3) 已查明这一地区至少存在有六个硅质喷发中心,以及 (4) 在 Copley 绿岩最上部有玻苏安山岩存在 (Lapierre 等 1985), 这表明裂谷事件刚好在流纹岩喷发以前开始。

根据已知的主要矿床和矿床群的线形排列以及矿床群内单个硫化物矿体所表现出来的线形延长样式,可以归纳出线形延展样式有三个主要走向,即 $N23^{\circ}E$ 、 $N37^{\circ}E$ 和 $N60^{\circ}E$ 。此外还有一组次要的北西方向,见于该区的北部。已知的多数大的矿床都是位于上述走向的两条或多条线状构造的交切部位,在其它可鉴别出来的走向交会处可能存在有隐伏矿床。

Lapierre 等人 (1985) 对 Copley 绿岩和 Balaklala 流纹岩火山岩作了详细的岩石学和地球化学的研究,认为 Copley 绿岩的玄武岩和安山岩呈现为岛弧环境中典型的低钾拉斑玄武岩套的岩石学的和地球化学的特征。而 Balaklala 流纹岩的岩石学和地球化学特征则较单一,很少拉斑玄武岩源特征。Copley 的最上部高镁安山岩 (玻苏安山岩) 的出现,与弧后的扩张期及裂谷期有关系,这是与现代弧的对比而得出的认识。现代弧中玻苏安山岩的喷出,被解释为弧后发展的第一阶段, Lapierre 等人指出,刚好在 Balaklala 流纹岩早期喷发以前出现了指示裂谷作用的玻苏安山岩,这与扩张构造状态的概念是一致的。扩张构造是根据在整个 Balaklala 喷发旋迴中最为常见的其他证据推断出来的。

Howe 研究了西沙斯塔地区块状硫化物矿床的矿物和结构构造,指出矿石主要是由黄铁矿和少量黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、砷黝铜矿、石英、白云母、绿泥石、方解石,以及一些痕量的矿物包括磁黄铁矿、毒砂、斑铜矿和伊达矿等组成。Howe 把矿化分为六个阶段 (1) 细粒的局部呈胶状的和结核状黄铁矿以及闪锌矿的沉淀, (2) 为细粒的毒砂和粗粒的黄铁矿沉淀,后者包裹有极小的磁黄铁矿包体,这一阶

段以区域性的断裂和角砾岩的产生而告终, (3) 黄铁矿、方铅矿、砷黝铜矿和石英沉淀并交代第二阶段的硫化物矿物, (4) 已有矿物的重结晶和再活化作用,

(5) 石英、白云母、绿泥石和方解石沉淀及它们随后的变形以及 (6) 硫化物矿石的次生富集。Howe 的意见是,尽管有绿片岩相变质作用和局部的侵入体热作用,但矿石所保留的大量原始沉淀特征,足以表明 West Shasta 矿床与黑矿型和 Besshi 型块状硫化物矿床有相似的形成过程。矿物和结构的证据不能证明在二叠纪期间有块状硫化物的第二个主矿化期。

Kistler 等人 (1985) 以对块状硫化物及主岩的放射性同位素和稳定同位素的研究为依据,指出 Copley 绿岩和上覆的 Balaklala 流纹岩代表早泥盆世的双模式硅镁质岛弧岩套,该岩套由于遭受了与块状硫化物沉积同时的海底热泉作用,已普遍发生了蚀变。蚀变与矿化的结果使 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 的初始值变化不一,其范围从 0.7029 到 0.7064。7 个流纹岩样品和两个硫化物矿石样品,表明全岩年龄为 400Ma,其 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始值为 0.7060,这一数值可以代表由海底热泉导致的火山岩筒的蚀变和矿化作用的平衡值。Mnle 岩株、Copley 绿岩和 Balaklala 流纹岩中 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 平均值为 0.51255,年龄 400Ma,这一平均值说明,这些岩石是在岛弧环境中,由衰竭地幔派生出来的。按照 Kister 等人的意见,石英-绢云母样品的 K-Ar 年龄以及一个流纹岩样品、一个石英绢云母样品和一个块状硫化物样品的 Rb-Sr 系列,均说明这一地区的局部地段发生过未被察觉的矿化。

Doe 等人认为,从西沙斯塔研究中已较好地确定了泥盆纪海洋地幔的铅同位素为 $^{206}Pb/^{204}Pb = 17.830$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb = 15.50$ 以及 $^{208}Pb/^{204}Pb = 37.313$, $^{206}Pb/^{204}Pb$ 的某些值非常高,表明 West Shasta 地区可能发展到比原先所设想的更靠近大陆,但同位素的证据不够充分。 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 的高值指示为海底弧环境,而玄武质安山岩和斜长流纹岩中钼的极低值指示为海洋扩张中心,然而,由于已知岛弧来源于衰竭地幔,并且 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 的高值在洋中脊玄武岩中极为稀少,因此, West Shasta 构造背景的最优模式是下沉的火山弧。

Taylor 和 South 所做的稳定同位素研究使得他们认为 Copley 绿岩、Balaklala 流纹岩和 Mule Mountain 岩株可能来自同一原始源,并认为在硅质浆岩生成期间就有大陆壳存在的说法是没有氧同位素证据的。Taylor 和 South 得到的其他结论是, Copley 绿岩的蚀变是由玄武岩、安山岩与海水在温度为 150—450℃ 的范围内反应的结果,并认为 Mule Mountain 岩株的侵

入与Balaklala流纹岩中部含矿单元为同期。

Mule Mountain 岩株是产生最大块状硫化物矿床群的热液系统的主要热源。区域性的 ^{18}O 衰减形式和Copley绿岩中的水合作用说明, 主要热液系统环绕在Iron Mountain地区。Taylor 和South 提出Balaklala流纹岩底部和中部单元在近喷气孔处, 高温蚀变和矿化作用期间, 遭受了硅化。相反, Balaklala 流纹岩上部单元为低温蚀变, 温度可能小于 125°C , 是在大多数沉淀硫化物的热液活动之后发生的。所提出的化学的和硫同位素的证据表明, 块状硫化物矿床中的硫是在下伏玄武岩蚀变成绿岩时从中淋滤出来的。

Bence和Taylor (1985) 根据稀土元素和氧、氢同位素特征的研究和分析认为, Copley火山岩和Balaklala建造中的火山岩乃是低钾的钙碱性岩套的组成部分。不相容元素(包括轻稀土元素)的耗尽说明这套岩石的源区经历了一个早期(早泥盆世)熔融期, 而且西沙斯塔地区的火成岩是在此期以后由该熔融残余物经重熔而生成的。Bence 和 Taylor 指出, Copley绿岩和Balaklala流纹岩有相同的稀土元素组合, 这说明它们来自同一个或相似的岩浆源, 而玄武岩和Mule岩株缺乏Eu异常, 推测它们来源于上地幔而不是来源于下地壳, 但这只是推测, 还未经证实。

^{18}O 值的范围很小, 这表明许多Copley绿岩和Balaklala流纹岩的下部和中部单元通过与海水相互交换, 广泛地发育了钠长石化和绢云母化, 并且这两种火山岩地层的氢同位素特征与区域性的海水交换过程中发生的绿泥石化的氢同位素特征相一致。区域性交换不影响稀土元素及其他惰性的不相容元素, 但它们却显著地影响着较活动的痕量元素, 例如Rb、K、Sr和Ba等的分配。Bence和Taylor注意到, Hg、Sn、As、Sb、F和Mo以及部分贱金属的富集, 发生在古火山通道周围, 矿化流体就是从这里散发出来的。他们认为这些金属乃是热液流体中的重要组分。

South和Taylor (1985) 根据Iron Mountain的稳定同位素和矿物学研究, 认为海水是热液流体的主要成份, 这种热流体在矿床的近旁引起了蚀变, 而且石英是叠加在硫化物矿物附近的。他们根据(Taylor and South 1985) 块状矿石和细脉状围岩中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值的范围, 认为硫的初始来源是岩浆, 它是当Balaklala流纹岩和Copley绿岩发生热液蚀变时从其中的硫化物中淋滤出来的。块状硫化物矿体中的黄铁矿, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 很均一, 这反映了它们是从同位素组成和物理化学条件都相当稳定的流体中沉淀出来的。块状硫化物中石英的氧同位素组成表明, 温度较高的热液流体存在于矿床下部, 即铜锌富集带之下, 而不是存在于贱金属带之

上的以黄铁矿为主的块状硫化物中。South和Taylor认为, 为同位素和矿物的证据表明Iron Mountain矿床的主要热液通道是在Brick Flat露天采场以西的Old Mine区。

Botinelly等人(1985)的著作指出, 有许多微量和痕量元素富集在Balaklala和Iron Mountain等地块状硫化物中的黄铁矿层中部, 而且通过对块状硫化物、浸染状硫化物和磁铁矿(Iron Mountain)中的痕量元素含量的对比, 认为他们的成因可能是不相同的。磁铁矿中痕量元素的总量及其产出的模式表明, 它不是硫化物的一种等价氧化物。

Sanlone 和 Domenico (1985) 发现来自浸染状硫化物的铁帽与来自块状硫化物的铁帽相比, 其痕量元素含量较低而且数值范围较窄。铁帽表皮或表面的痕量元素含量几乎与全岩铁帽的没有差异。

应用单元概念和将每一矿床的铁帽分析作为分组的计算机程序, 被用来研究痕量元素含量特性。Mammoth矿山的铁帽对多数元素来说, 有极高的异常量值, 并且也有极高的元素含量。Spread Eagle矿山的铁帽与已研究过的其他矿山所见到的铁帽在元素组合上有许多不同, 而且有极低的异常量值。

Mammoth矿山的铁帽对大多数元素来说在元素量级方面列为第一, 并显示最高异常量值, 而Spread Eagle铁帽则呈现为最低异常量级。在四个已研究过的矿床中每个矿床的铁帽都显示出有不同的元素组合, 这些在报告中都有记载。

Horton等人(1985)曾发现小比例尺和大比例尺的电法地球物理测量能弄清各种各样岩石的基本电学特征, 并说明了这类测量在地质背景方面的应用, 还指出了它在勘探方面应用的可能性。然而, 他们根据自己所做的大量地球物理工作引出的主要结论是, 必需采用不同方法进行综合地球物理测量才能解决West Shasta地区复杂地质环境内的勘探问题。

Raine等人(1985)用近红外光谱研究了西沙斯塔铁帽, 并以这些铁帽与在潮湿气候中形成的铁帽如澳大利亚的(真铁帽)做了对比, 与在干燥气候中形成的那些铁帽如沙特阿拉伯的(假铁帽)做了对比。强调了了解铁帽的矿物和气候环境二者在评价铁帽时的重要性。真铁帽光谱范围为800到2500nm, 它与假铁帽的光谱有显著不同。在潮湿的热带环境中, 高岭石的类型(由特征的光谱图像来识别)它对区别真假铁帽是很特征的。在干燥环境中, 真铁帽保存有从块状硫化物矿床中继承下来的矿物, 而假铁帽则无, 但是其主要的不同特征是真铁帽有针铁矿, 假铁帽有赤铁矿, 在光谱中区别得很清楚。

West Shasta 气候环境介于潮湿的热带气候与干燥气候之间, 外铁帽的淋滤不彻底, 与假铁帽类似, 并具有以针铁矿及新形成的硅酸盐矿物为主的光谱特征。内铁帽与澳大利亚的真铁帽相似, 并有以赤铁矿和剧烈淋滤的新形成的氧化物和硅酸盐矿物为主的光谱特征。West Shasta最大的块状硫化物矿床——Iron mountain矿床的铁帽, 其光谱特点与这一地区的那些较小的矿床不同, 构成了矿物分带。

Lindlert (1985) 认为这一地区主要的 地堑系统是由于地壳拉伸而发育起来的, 并由于海底热泉活动

的结果, 在海底凹地沉淀了块状硫化物, 例如他认为在该区存在一个主要地堑叫做“Enreka地堑”。从蚀变的火山底板岩石中淋滤出的金属, 为块状硫化物矿石聚集体提供了主要的金属来源。按Lindlert 的观点一旦矿化期结束, 则流纹质火山作用像以前一样从同样的火山源重新开始, 没有硫化物矿石的进一步沉积。在火山旋迴结束时, 泥盆纪的沉积物便开始聚集在推测的火山岛侧翼的周围。

陈丙芳 译
任建新 校

加利福尼亚州西沙斯塔矿区的 区域环境和地质新知

John P. Albers John H. C. Bain

摘 要

西沙斯塔 (West Shasta) 块状硫化物矿区, 位于一系列组成克拉马思山 (Klamath Mts.) 的加积岛弧和洋壳地体的最东部。以早泥盆世为主的海底火山岩序, 是岛弧地体的主要组分, 也是硫化物矿床的容矿主岩。Copley 绿岩, 主由安山质和玄武质枕状熔岩流和角砾岩组成, 总厚至少 1,800m, 是岩序中最老岩层。它被 Balaklala 流纹岩所覆盖, 并被其岩墙所侵入。西沙斯塔矿区之东北, 绿岩又覆盖了 Balaklala 流纹岩, 这说明在矿区之东, 可能有一层巨厚的绿岩覆盖了有矿化潜力的流纹岩。但是最近的研究说明这种复杂关系可用褶皱来解释。

Balaklala 岩序由硅质岩流、角砾岩和凝灰岩组成, 最大厚度略为超过 1000m。Kinkel 等 (1956) 把 Balaklala 分为三个单元: 最下为非斑状至微斑状单元, 会大量角砾岩和凝灰岩; 中部为含有粒径 1—4mm 石英斑晶的流纹岩, 其上半部含有凝灰岩、角砾岩和黄铁矿质块状硫化物矿体; 上部一般含有粒径超过 4mm 的暗色石英斑晶。上部单元的下部有很大部分是火山碎屑物, 而该单元的上部则大都为块状火山岩流。至少发现了六个 Balaklala 流纹岩的喷发中心, 其中有三个位于过去采矿区的 17×3 km 范围之内。

岛弧岩序中最年轻的岩层是 Kennett 组, 下部由含放射虫的黑页岩和燧石组成, 说明属较深水的沉积, 上部由灰岩组成, 含有可能属早泥盆世的浅水动物化石。有一个以 Mule 山命名的奥长花岗岩岩株, 年龄 400 Ma, 侵入 Copley 绿岩和 Balaklala 流纹岩中。与这些火山岩层基本上属同期。

黄铁矿质块状硫化物矿床呈并独矿体而成群产出, 这主要是由于成矿后的断裂破坏所致。矿床在地层上局限于 Balaklala 中部的近水平层的上部, 而它们的水平分布则据解释是受了早泥盆世盛行的张性构造体制的影响。这种体制的主要地质证据, 就是由上述的喷发中心的分布, 区中八九个块状硫化物群的分布, 和这些群彼此之间的相似的分布关系等, 所表现出来的明显占优势的延展方向。延展的优势方向, 无论在小构造还是大构造上都可概括为 $N20-25^\circ E$ 、 $N37^\circ E$ 、 $N60-80^\circ E$ 和 $N40-60 W$ 。三个北东方向在全矿区普遍占优势, 而北西方向仅在矿区北部清楚, 较带推测性质。主要矿床群位于主要构造线的交叉点, 有些曾为地堑。在有地层上有利的 Balaklala 中部单元存在的地方, 未知有矿的构造点交叉点, 可以作为很好的勘探目标。

引 言

自从 Kinkel 等 (1956) 的美国地质调查所专报 285 号 (U. S. Geological Survey Professional Paper 285) 发表以来, 我们对块状硫化物型矿床的认识有了一个新飞跃, 认识到这种矿床是海底火山成因, 基本上与围岩共生, 可能是由海底火山堆积层中的热泉沉积而成。这一成因最初是从出露良好、变形较少的日本黑矿中认识到, 以后发现这也是西沙斯塔矿化的主要成因 (Kinkel, 1966; Casey 和 Taylor, 1982; Reed, 1977, 1983, 1984), 但是在一些矿床中, 交代作用对于后期金属的再分布可能有一定作用。

要想认清块状硫化物矿床是与主岩 Balaklala 流

纹岩共生而非后生交代矿床, 就得反复研究和反复解释与矿床沉积环境和其分布有关的重要地质现象。本文将在简述西沙斯塔矿区在克拉马思山区域构造格架中的位置之后, 集中讨论下列几个主题:

1. 关于究竟只有一层绿岩即 Copley 绿岩下伏于 Balaklala 流纹岩之下并被其岩墙所侵入, 还是另有第二层绿岩覆盖在流纹岩之上的问题。如果有两层绿岩存在, 象西沙斯塔区之东的 O'Brien 山区所见情况 (Albers 和 Robertson, 1961), 那么含矿的 Balaklala 流纹岩中部含矿层可能是包褶于上绿岩层之下, 并向东延, 超出 Kinkel 等 (1956) 地质图所绘的东界。在此情况下就应考虑到过去未曾预期的一些地方有埋藏的块状硫化物矿床的可能性。与此连带发生的问题

是, Copley绿岩与Diller (1906) 所述的 Bass山 辉绿岩之间是什么关系——该岩紧靠Copley之东出露, 据Diller测绘, 它延至 Kinkel 等 (1956) 图区的最东南部。

2. 关于Balaklala 各主要岩性单元的分布形式和侧向范围的问题——它们指示了各个硅质层的可能海底喷发中心的位置, 并指出在矿质沉积期间盛行的构造环境。

3. 关于Kennett组的岩性、构造和分布范围的问题——它指示了以早泥盆世时期为生的岛弧系的结束期的地质-构造环境。

4. 本文提出的关于块状硫化物矿床沉积期间盛

行的张性构造环境。

区域构造环境

据 Irwin (1981) 描述, 克拉马思山地质省是一个面向西的弧形区, 由海相亲弧火山岩和沉积岩以及超镁铁岩和其它蛇绿岩组成。该地质省东邻 Cascade省的第三纪火山岩。从构造上讲, 克拉马思省由洋壳和岛弧地壳的板片构成 (构造-地层地体), 板片之间为缝合线, 往往但并非都以超镁铁岩带为标志。一整系列的为断层所分隔的地体, 形成了弧形覆瓦状的向东倾斜的序列, 有明显的向东凹面 (图1)。最东地体称为东克拉马思地体, 据 Irwin (1981) 认为曾是一个

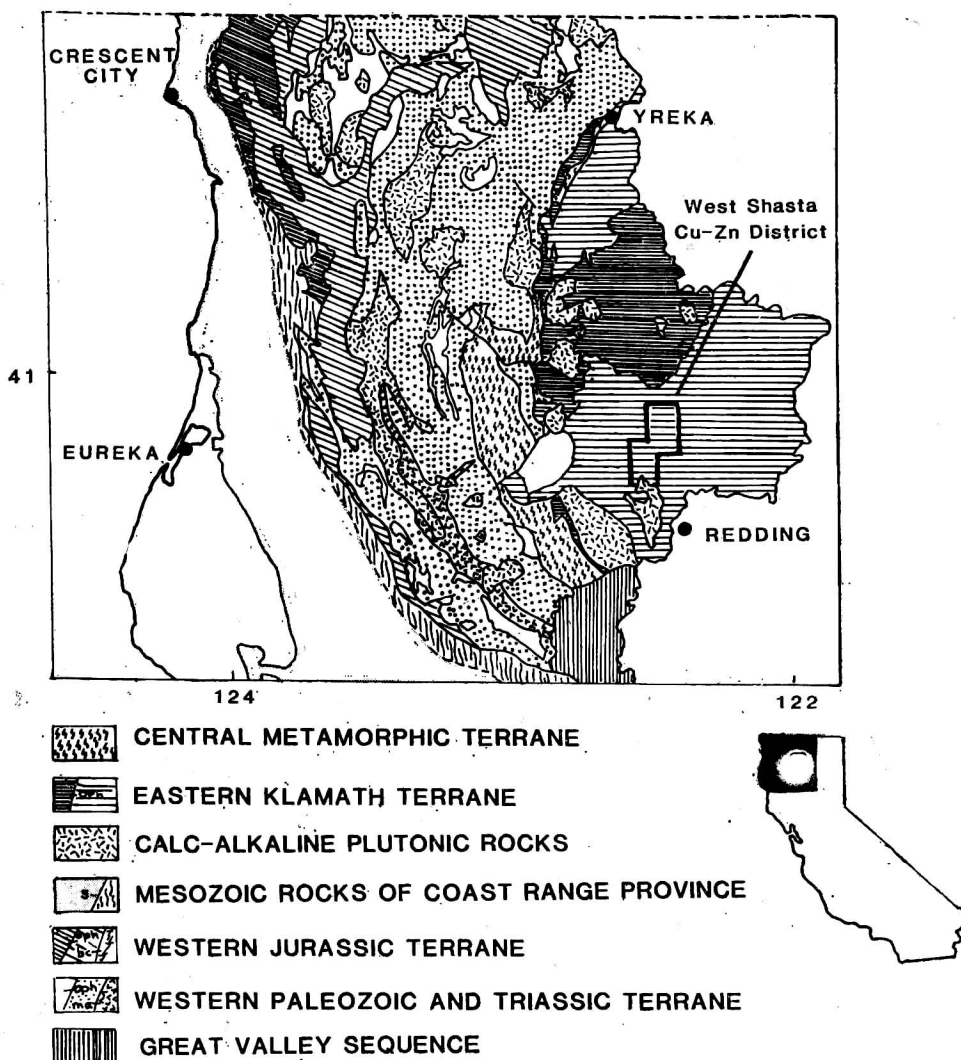


图1 加利福尼亚州克拉马思山南部的东克拉马思地体 (Eastern Klamath terrane) 中西沙斯塔 (West Shasta) 矿区的构造环境 (据Irwin 1981图修改)

长期存在的弧核,在中生代时期由于海底扩张作用,其西的各个地体陆续地向它上面加积生长。

据 Irwin (1981),东克拉马思地体是由三合一的超镁铁岩岩席构成,可能底部为蛇绿岩,其上覆有火山岩和沉积岩,年代由古生代早期至侏罗纪。成因上与三合一超镁铁岩岩席有关的辉长岩和奥长花岗岩(trondhjemite),同位素年龄为439和480Ma (Lanphere, 等1968; Mattinson 和 Hopson, 1972),属奥陶纪。奥陶纪至泥盆纪岩层,包括拉斑玄武岩质绿岩,在地体北部出露,而泥盆纪至中侏罗世岩层则在地体南部和东部形成向东作区域倾斜的岩序。西沙斯塔矿区位于该岩序范围的西部,其西大部分与三合一超镁铁岩岩席相邻接。

西沙斯塔矿区的泥盆纪岩序,一般根据岩性学、岩石学 and 同位素研究 (Barker, 等, 1979; Doe 和 Zartman, 1979; Irwin, 1981; Lapierre, 1985),认为是原始岛弧,即由地幔物质分异生成的各种火山岩组成的火山堆积体,而与陆相岩层很少或没有发生过相互作用的迹象。它主由Copley绿岩组成,被Balaklala流纹岩所覆盖,有时与之成互层^①,并被其岩墙所侵入。这些火山岩层都被早泥盆世Mule山岩株所侵入。岩株年龄400Ma,是由谐和的铀铅年龄和钾氩年龄确定的 (Albers等, 1981) (图2)。Balaklala流纹岩据认为与Mule山岩株同源 (Barker等, 1979),而Balaklala流纹岩与绿岩的局部互层关系,说明Copley绿岩属于同时代,可能也是同源的。泥盆纪 Kennett 组,在一些地方整合覆于Balaklala流纹岩之上,当没有 Balaklala流纹岩时,就覆于Copley绿岩之上。它也是岛弧岩序之一部分,但从未见与Mule山侵入岩株发生接触。

东克拉马思地体东南部的以早泥盆世为主的岛弧岩序之上,覆盖着一套碎屑、火山、火山碎屑和碳酸盐岩,年龄由密西西比纪至中侏罗世。这一套年龄岩层中有一大部分为中二叠世岛弧岩序,岩性与泥盆纪岩序相似。它包括一个厚层安山岩层 (Dakkas 安山岩) 和一个硅质层即 Bully Hill 流纹岩层,为东沙斯塔区块状硫化物矿床的容矿岩,恰好 Balaklala 流纹岩为西沙斯塔区块状硫化物矿床的容矿岩一样 (Albers 和 Robertson, 1961)。二叠纪岛弧岩序为261Ma (R. E. Zartman 1982年用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄测定)的Pit River 岩株和其它可能与岛弧火山岩同时期的侵入体侵入。

前述的克拉马思山地体的岩序向东呈现的凹形,在西沙斯塔区从 Balaklala 主岩体的长轴走向的变化可以反映出来:它从图 (图2) 的南西 1/3 部分的约

N20°W, 通过中心向北,变为约N25°E,直到山姆大叔 (Uncle Sam) 断层 (见图2),这时构造线又转回到大约正北了。从北西变到北东的这种肘状弯曲,不仅由 Whiskeytown 以东的 Balaklala 流纹岩主带的方向变化反映出来 (图2),还可由 Kinkel 等 (1956) 图版 1 和 3 的平面构造的类似变化反映出来。但是这种变化在 Mule 山岩株以东却没有以类似的变化反映出来,这或许是由于岩株侵入时有一个向西推挤的力量所致。但是在 Mule 山岩株以东约30km的东沙斯塔区,却有一个方位类似的肘状弯曲发生在二叠纪和三叠纪地层中,表现得更为明显而更广泛,有好几公里长。有一条方向为N60°E的枢纽线穿过这个肘状弯曲,如果把它向南西投影,就会与 Whiskeytown 以北的肘状弯曲重合。这一现象因此应为三叠纪后构造事件的结果,而不仅是泥盆纪岛弧岩浆作用中的异常现象。

泥盆纪岛弧岩序的地层和构造

Copley 绿岩

Copley绿岩据 Kinkel 等 (1956) 描述,是西沙斯塔区基底地层,由互层的火山岩流、凝灰岩、块集岩和少量薄层的凝灰质页岩和黑色页岩组成。Copley 属早泥盆世,也许更早些。底部未出露,出露部分厚度估计约1800m。最近 Lapierre 等 (1985) 将此组地层分为下部 and 上部,但它们的分布并未在图上绘出,图2中也未示出。下部由粗粒火山角砾岩、火山砾凝灰岩 (有的有粒级层理)。以及苦橄质、玄武质和安山质岩流组成。上部厚约400m,由一层玄武质和安山质枕状岩流组成,覆于一层枕状角砾岩之上。火山岩层下部的枕状体很大,斑状,有直径约1cm的气泡,而上部的枕状体较小,含有大量绿泥石化基质。上部不夹含沉积岩。Lapierre等发现Copley的最上部有高Mg安山岩或玻古安山岩 (boninite),说明该区在 Balaklala 流纹岩开始喷出之前就有裂谷作用。

Copley绿岩为 Balaklala 流纹岩所覆盖,据 Kinkel 等 (1956) 描述,它们之间局部有渐变接触。如果有过渡层存在时,该层为 Balakala 型非斑状和斑状流纹岩的圆化碎块,产于凝灰质、安山质基质中。Balaklala 流纹岩下部夹含少许薄层 Copley 型绿岩岩流,说明中性岩的喷发在 Balaklala 流纹岩喷发开始后还继续了一个时期。这些岩流在图2和 Kinkel 等的图版1 (1956) 中作为 Balaklala 流纹岩的一部分。

Kinkel 等 (1956) 认为绿岩的绝大部分比 Balak-

① 所谓与Copley绿岩成“互层”的 Balaklala 流纹岩,很大部分似属侵入岩席。

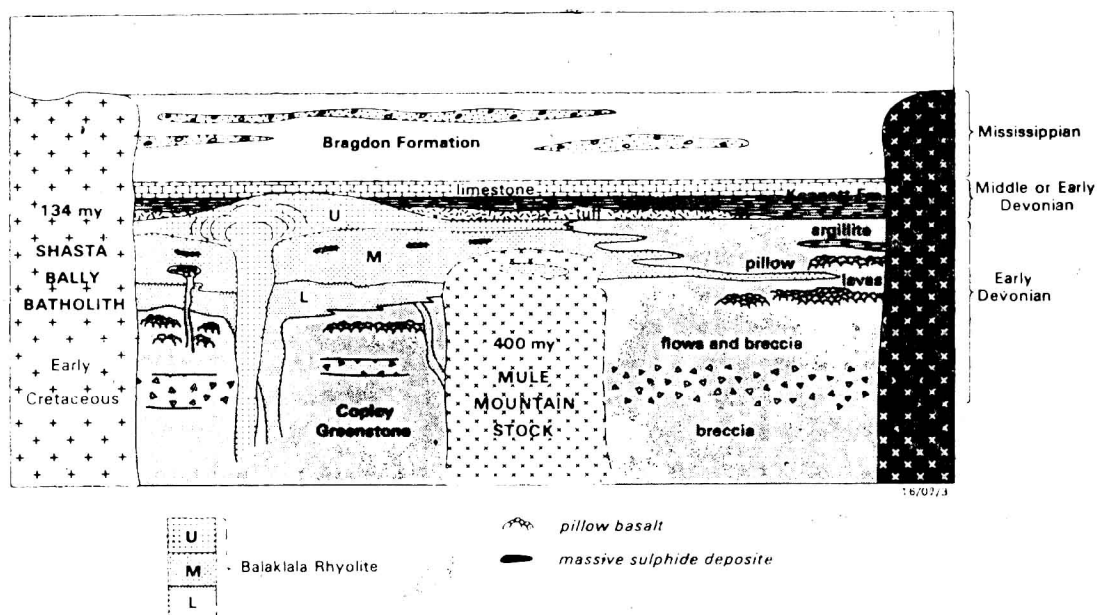


图 3 西沙斯塔区各岩层相对年代示意图

lala 流纹岩为老并作为其基底，但又提到在图区东部流纹岩尖灭，局部与绿岩成交互层。他们并指出，就在西沙斯塔图区东北方的O'Brien山区，Balaklala流纹岩明显地被Copley型绿岩所覆盖，而后者又被Kennett组所覆盖。因此绿岩就有一部分与流纹岩同期和比它更新（图3）。

Albers和Robertson（1961）认为O'Brien山区的情况（图2）意味着在Balaklala流纹岩之上有一大层绿岩，在其下也有一大层绿岩。这有必要进一步考察和解决，因为这不仅有地质意义，而且可能还有经济意义。关键地点是在紧邻矿区东面，那里在Kinkel等（1956）的图上地层突然变陡，还有在沙斯塔坝（Shasta dam）南西一段距离处，从图上（图2）显示绿岩和流纹岩都可能褶皱起来。本区及其以南的主体绿岩，是否可能覆在含矿流纹岩之上而非在其下呢？或者，是否当流纹岩与其下伏Copley绿岩作指状交错和紧密褶皱时就迅速尖灭呢？

有两种不同而又彼此相关的方法曾被用来评定在Copley绿岩-Balaklala流纹岩岩序中有可能有两大层绿岩，和重新厘定该区的区域和局部构造。第一，研究了Kinkel等1945—1951年工作时尚未开挖的公路路堑和冲刷完全的湖滨露头，以便确定Balaklala流纹岩与绿岩间的东部接触性质。第二，用常规的构造分析方法重新分析了Kinkel等（1956）图上所记录的构造数据，另外，还对Redding镇西Sacramento河

岸上出露的泥岩与Copley绿岩的互层，和Shasta湖中Slaughterhouse岛上Kennett组的燧石页岩，进行了小面积的褶皱构造详细测量（图2）。由于解决“两层绿岩”问题主要靠构造解释，所以我们在这里做了构造形态描述结合讨论绿岩，不另分节。

断层：西沙斯塔区泥盆纪火山岩序受至少12条高角度断层所破坏，断层走向由N60°E至约正东西，一律北降南升。大部分硫化物矿床均受这些断层的错断（图2）。在Lone Star探点和在Balaklala矿和Early Bird矿，一些较小的东西向正断层也都是北降南升。Kinkel等（1956）提到在Iron Mountain和Mammoth矿区的一些大的北东向断层，是成矿前发生并有成矿后的运动，同时还看到各矿中几乎所有断层都有成矿后运动，并且都表现为后期破坏，最新可到第三纪。但是，由于这些断层只错动了泥盆纪时代的岩层，包括块状硫化物矿体，所以很少有证据说明明确的年代。

虽然专报285号的作者们发现了西沙斯塔区的这些大断层和其他许多断层，但是在他们工作的四十年代后期的天然露头不足以充分显示泥盆纪火山岩中小断层的范围和广泛程度。此后在五十年代修了一条从沙斯塔坝到Mammoth矿的公路，切出的露头于1981测绘，测出几十条在图（图2）上无法表示的小断层。这些断层大部走向东西或北东东，与区中较大断层一致。详细测图还发现，密集的东西向断层在Redding

镇西Sacramewto河沿岸切割与Copley绿岩互层的泥岩层，位置在采矿区以南很多。据推断，这一方向的断层在整个西沙斯塔区都盛行，但是它们只能在出露良好的地方才能看清楚。另一组在Shasta坝-Mammoth矿公路沿线见到的相当清楚的方向是南北向，还有少数断层作北东向或北西向。倾角一律陡至中陡，动运大部是正倾向滑动。大部单独断层的断距都很难或无法测定，但看来一般由几英尺^①到几十英尺。很少断层能够追索到路堑之外多么远，但很可能它们是稠密交织断层网的一部分，它们与较软岩层中发育的许多紧闭至平缓的褶皱以及发达的破劈理一起，使该地区在构造上比以前了解的要复杂得多。

大量的小断层往往形成了Copley绿岩与Balaklala流纹岩之间的接触带，这就使路堑中看到的这两个火山岩层间的地层次序变得模糊不清了。从Shasta坝经Friday-Louden门至Mammoth矿的公路路堑中，至少露出了10处绿岩与流纹岩的接触，每个接触都是断层。但这些断层接触并不能否定原来公认的Balaklala流纹岩覆盖主要Copley绿岩的结论，例如在Dry Fork和Squaw Creek (图2)等地和再往南往西，无论地形和地层关系都明显地符合这一结论。然而在例如Mule山岩株以东地区，断层接触就把地层关系搞

乱了，那里的总的向东倾斜，说明这种关系可能颠倒了。

褶皱和褶皱形态：Kinkel等(1956)指出，区中岩层产状从水平至直立，而“岩层在一些地方强烈褶皱，可是邻近地方就仅有中等褶皱。当邻接岩层强度差异特大的地方，褶皱的分布也就极不规则”。他们还看到叶理“在区中许多地方常见”，由片麻理或片理(Shasta Bally岩基的晕中)直到破劈理都有，“虽然岩层在许多地方都很平缓并且只有轻微的层间运动或层面劈理”。值得再次强调的是，从零散的层理产状、岩层露头产状和硫化物矿体形状的测量结果说明整个硫化物矿区中构造都是近水平至平缓褶皱的(见图4A)。下文着重讨论的问题区，在矿区以东和Mule山岩株以东，也就是岩性以绿岩为主的地方(图2)，这个地方测出的假定层理倾角突然变陡，而且相当均匀地向东倾斜。

在Kinkel等(1956)的1:24,000比例尺图上所表示的实测层理和叶理的产状，在Copley绿岩区域中最多。Kinkel等(1956)没有讲清层理的特性和认识及测量它们的依据，他们也没有鉴定出实测的叶理性质和世代。在下文的分析中，假定层理面的鉴定和测量是正确的，叶理一律定为构造性和第一世代的(S_1)。

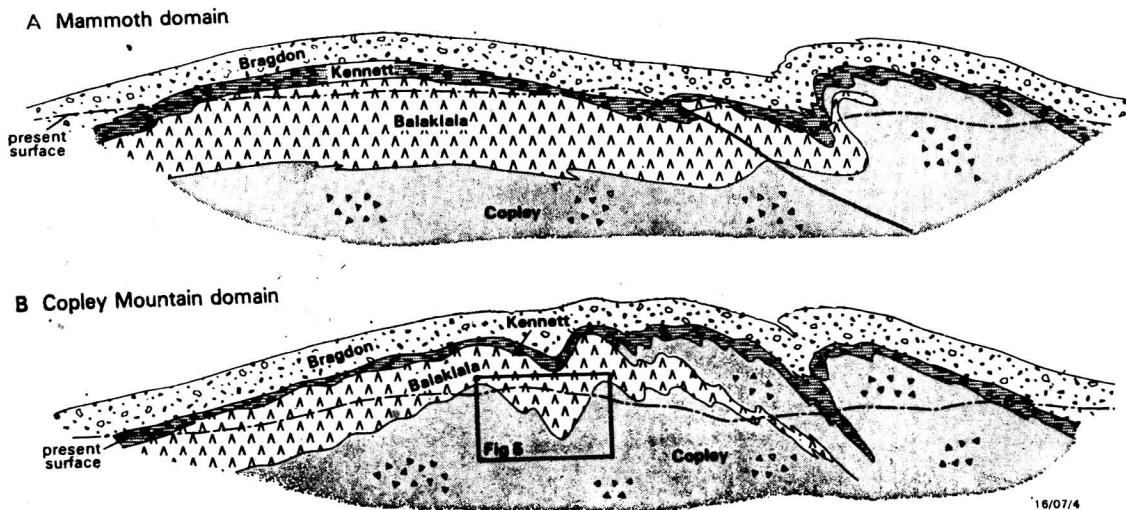


图4 变形后构造关系和褶皱样式示意剖面 (F_2 和大多数断层均略去)

在Shasta坝以南沿Mule山岩株东侧的Copley绿岩中，许多紧闭的南北向褶皱，可由图上流纹岩和泥岩体的长条形状推断得知(图2)，当然也可以认为这些岩体不过是绿岩中的透镜体。这些长条体以后又沿东至北东方向再褶皱，也可从图上看。同样，图上Balaklala流纹岩中和下部的露头，是一些雁行状排列的长

条体，端部往往很尖，作北向或北东向排列，表示一系列向北或北东弯曲延展的中度至紧闭褶皱(图2)。另一方面，这种形式也可能是斑状与非斑状岩石作复杂指状交插的结果，如Reed(1984)在西沙斯塔区

^① 英尺为英美制长度单位，1英尺(ft)=0.3048m

Keystone采矿区所见。不管怎样，本区整个南部明显的北至北东向延展的露头形式，起码一部分属褶皱形成。实测的和推测的褶皱往往伴有断层，其间隔以岩层平缓、一般无叶理的变形较少的地带。

对图中数据的分析，立足于认出了两个具不同构造样式的区（下文称域（domain）），它们之间隔以东西走向的山姆大叔大断层带，它由山姆大叔矿东延直到Butcher Creek（图2）。该断层在被Shasta坝—Mammoth矿公路切穿处至少宽100m。断层以北的域叫做Mammoth域，以南叫Copley山城。见图4。

Copley山城由Copley绿岩和Balaklala流纹岩组成，有表示较紧褶皱的指状交插接触现象，和一般向东的陡倾，但据Kinkel等（1956）图版1所示，Copley绿岩中至少有40%的层态属向西陡倾。在Iron Mountain区钻探得知的较为开张的褶皱（图5），似乎大都限于绿岩之内和流纹岩的较薄部分。

这些岩石中最常见的叶理是破劈理。Redding镇西（属Redding亚域）Copley绿岩中夹含的硅质泥岩层，显示了多次变形，其中有（1）紧至等斜褶皱，

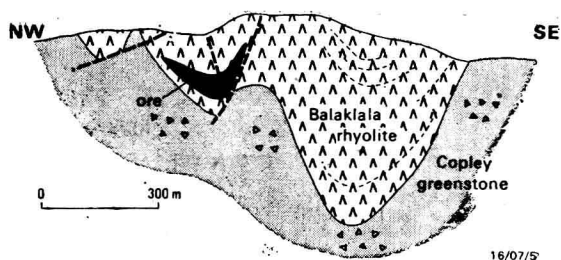


图 5 Iron Mountain区闭合至紧闭褶皱
(据Kinkel等, 1956)

并有部分层理换位（图 6A）和东向陡倾的轴面叶理（板劈理），（2）向北东倾伏的小褶皱，具微弱轴面劈理，导致主 S_1 叶理发生局部细褶皱。从指向可以看出，该亚域位于一个大的倾斜或倒转向斜的西翼。

图 7 不考虑成分层理的性质，清楚地示出了Copley山域中特别是在Copley绿岩中沿北北东向近水平褶轴的紧闭褶皱。这些褶皱的轴面一般向东陡倾。测



图 6 (A) Redding附近 (Copley 山城, Redding亚域) Copley绿岩的硅质页岩层中甚紧至等斜的 F_1 褶皱和 S_0 的初始换位; (B) Slaughterhouse 岛 (Mammoth域) Kennett 组的燧石页岩中紧闭 F_1 褶皱

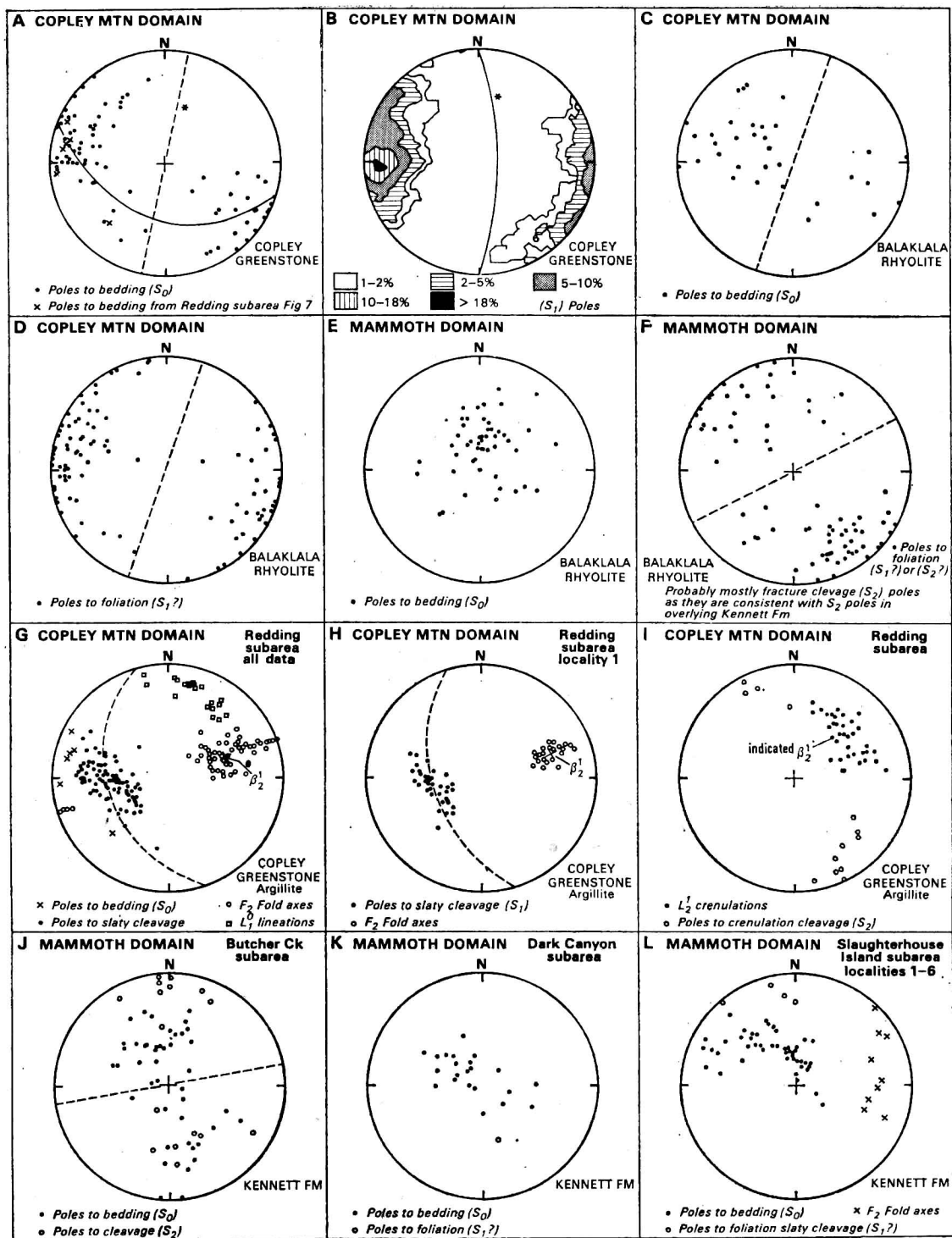


图 7 Copley山域和Mammoth域构造数据概略图

出的叶理面 (S_1) 的性质和世代在图中未定出, 它们的层态相似 (图7B和D), 可能是图7A和C所示 F_1 褶皱的轴面。

Redding亚域泥岩层的构造数据 (图7G、H、I) 说明至少在此区有大而紧以至等斜的褶皱, 翼部向东陡倾, 轴向南北。Redding 亚域数据 (图7G) 与整个Copley山域的 (图7B) 大致相合, 虽然 S_1 褶皱的分散程度较大, 但也有力地说明Copley山域中绝大部分测出的叶理, 正好所假定的, 属于 S_1 。同样, Redding亚域中少数几个测出的 S_0 极点, 都在图7A的 S_0 极点范围之内。

Redding 亚域数据也证实了具陡倾轴面和轴向东北倾伏 45° 的 F_2 褶皱的存在。 S_2 方位的变化, 可能是由于围绕 F_2 褶皱的扇状分散, 而不是由于后来的褶皱。

Mammoth 域与 Copley 山域之间隔以山姆大叔断层, 该域大部由Balaklala流纹岩和Kennett 组组成, Balaklala 流纹岩的主要喷发中心就在这里。它没有Copley山域褶皱得那样紧, 主要是一个向北东倾伏、具缓倾翼部的背形。看来, 这里的厚层硅质岩岩序, 对于区域构造应力的反应, 不同于Copley山域那些较软的绿岩-流纹岩岩序。上覆的Kennett组中, 褶皱较紧也较复杂。流纹岩中测得的叶理, 指示了北东东走向的褶皱, 轴面陡倾至直立 (图7F)。如果这些是 F_1 褶皱的轴面, 那就说明, 要么该域 F_1 方位与Copley山域本来就不同, 要么是由于后来的 F_2 (?)褶皱而变换了方位。也许, 这一叶理应为 S_2 即 F_2 褶皱的轴面。

对Shesta湖中Slaughterhouse岛Kennett组中几个燧石页岩露头的详细研究, 发现 F_2 方向相似, 但 F_1 产状大不一样。尽管 F_1 褶皱都是紧闭至等斜 (图6B), 但未见象 Redding 亚域中的岩层换位。由于岩层为燧石质, S_1 不发达, 而与 F_2 有关的叠加破劈理, 没有产生可见的皱纹。

层理 (S_0) 虽然由于断层和 F_2 褶皱的再定位作用而有局部变化, 但大都向东缓倾, 说明 F_1 褶皱大都是倾斜的, 轴面缓倾, 局部伏卧或倒转。

Slaughterhouse 岛的构造数据 (图7L) 大致与这些观测结果符合, 并与Mammoth域中的Butcher Creek亚域和Dark Canyon亚域 Kennett 组的实测构造数据符合。

图7L中 F_2 褶皱实测值的分散, 可能是起因于一组北东走向的褶皱叠加在向南东倾斜的缓斜 F_1 褶皱之上的结果, 这从露头上可见 (图6B和7L)。由于构造复杂, 资料又少, 从而很难判定, 是否 F_1 褶皱是单纯地或部分地由软地层滑塌形成 (见下) 而不是由使

Copley 山域褶皱的压应力所形成。如果全面考虑区域环境, 滑塌在变形作用中还是有一定地位的。

解释和推断: Diller (1906) 把 Mule 山岩株东边的Copley绿岩中夹含的页岩和凝灰岩与 Kennett 组对比。如果这个对比正确, 那么 Kennett 组的分布就至少能对区域构造和地层有两种不同的解释, 同时也能解决两层绿岩的问题。

第一个解释假定 Copley 绿岩岩序简单地向东倾斜, 未被褶皱复杂化, 认为这个岩序 (至少介于Shasta坝南东方向断层与Mule山岩株南端之间范围内) 包括了下层绿岩 (狭义的 Copley 绿岩) (夹含少量薄层流纹岩, 可能是Balaklala 流纹岩的末端?)、Kennett 组和上层绿岩。这个解释不好, 因为它要求有一个覆盖Kennett组的绿岩层, 可是在大多数地方Kennett组之上都覆以Bragdon组。这一解释也考虑到上文讲过的复杂区域构造。

第二个解释考虑到了上述的复杂构造, 认为Kennett 组目前在绿岩中的位置是由于褶皱, 特别是由于一个向东倾斜的倒转的大向斜, 它由一条不连续的燧石页岩层所标志, 从 Slaughterhouse 岛向南至少延至Shasta坝之东的断层 (图2)。由Dark Canyon (Mammoth域) 向东, 该构造北端由紧闭的、缓斜至伏卧的中等褶皱和向东缓斜的次平行断层所标志。由此往南, 在Shasta 坝以东地区, 向斜轴由南北向延伸的Kennett 组的不连续露头所标志。向东, 与之大致平行的背斜, 其轴通过Bass山, 可能是O'Brien山背斜向南的延展。Albers 和 Robertson (1961) 的图上所示Kennett组的层态说明此背斜的西翼是陡倾倒转的。如果这一构造解释正确, 那就只有一层绿岩, 尽管还有一层局部直接盖于Kennett组之上和在O'Brien山区与Balaklala 流纹岩成互层。即使在 Mule 山岩株以东Copley绿岩中夹含的页岩沉积 (图2) 不是Kennett组的一部分, 这个解释也依然有率。Kinkel等 (1956) 和我们都赞同这一解释, 但与Diller (1906) 的不同。这个解释的经济价值推断显然是不利的。既然在矿区以东的上层绿岩之下没有褶皱的流纹岩, 那末隐伏的块状硫化物是很少或没有希望找到了。

Balaklala 流纹岩的分布和与其它岩层的时空关系

Kinkel等 (1956) 把Balaklala 流纹岩分为三主层 (unit, 或译单元一译者), 再加两个过渡到上下组地层的过渡层。三主层是: 下层, 主为非斑状流纹岩; 中层, 含1-4mm石英斑晶的斑状流纹岩; 上层, 含>4mm石英斑晶的斑状流纹岩。

与下伏Copley绿岩之间的过渡层, 如果有的话, 是

由非斑状和斑状流纹岩的圆化碎块组成，产于绿岩基质中。另外，Balaklala 型岩石的岩流和角砾岩夹含在Copley绿岩中，而以斑状为主的流纹岩侵入其中。相反，正如前述，又有少量绿岩岩流产于 Balaklala 流纹岩中（图2）。与上覆 Kennett 组之间的过渡层，是主由流纹岩碎屑和一些石英斑晶及碎屑组成的凝灰

岩或凝灰质砂岩。Kinkel等（1956）认为这是Balaklala 流纹岩的最顶部，但我们认为它是 Kennett 组的最底部，理由见下。

据Kinkel等（1956），Balaklala 流纹岩最厚可达 1100m，但各处变化很大，三个主层也并非到处具全。下层和上层，在区北部的 Little Backbone Creek-

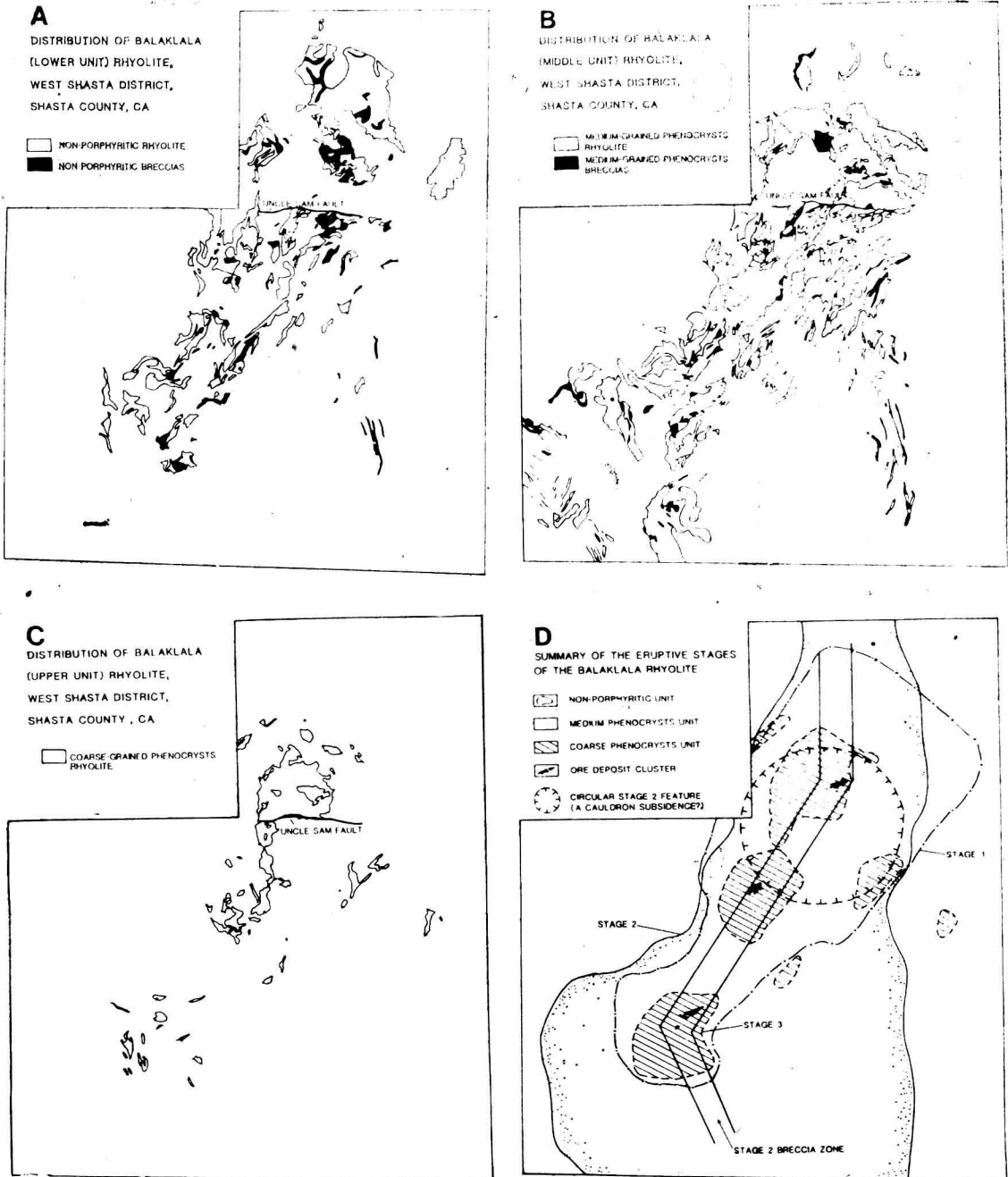


图 8 Balaklala 流纹岩的下、中、上层分布图A—下层；B—中层，短线表示岩墙；C—上层；D—喷发期略图

Mammoth Butte 地区最厚也最明显, 向南很快变薄。实际上在 Whiskeytown 纬度 ($40^{\circ}37'30''$) 以南, 在 Mule 山岩株东西两侧均无上或下层 (图 8A 和 C)。与此相反, Balaklala 的中层不仅在 Whiskeytown 以北范围大量出露, 而且向南又大量出露了 8 英里^①, 在 Male 山岩株边缘与 Copley 绿岩成互层作岩流(?)和岩床 (图 2)。岩株之内还见有 Balaklala 中层的顶垂体。Balaklala 流纹层不均匀的中层的分布比较为均匀的上和下层为广, 这一现象的解释, 是在中期火山活动最盛, 火山碎屑组分最多, 喷发中心最多, 范围也最广。

Kinkel 等 (1956) 提出 Balaklala 上部粗斑晶层是在 Mammoth Butte 地区喷出成为火山穹丘, 底部有一层凝灰岩, 说明开始是爆发相, 顶部又有另一层凝灰岩 (我们今天把它归入 Kennett), 向上过渡到 Kennett 组的页岩相。可是, 大面积粗斑晶流纹岩出露在整个矿区南部 (图 2 和图 8C) 并远至 Mammoth Butte 以南 16km 的 Whiskeytown, 这可能由于英安质岩浆流动性较大, 能够流出较远, 也可能是由于它是由一个以上的喷发中心喷出的。我们赞成后一种意见, 下文还要讨论。

Kinkel 等 (1956) 提出了许多证据 (大部分属间接的) 说明 Balaklala 流纹岩主要是海底成因, 在泥盆纪岛弧环境形成。主要证据是在显然同期的绿岩中枕状熔岩很多, 其中包括一些明显属于 Balaklala 层序的枕状绿岩。证明水下沉积的证据还有不连续的水沉凝灰岩透镜体, 大部分都产于中层的上部, 几乎全区所有已知的块状硫化物矿床的矿层之上都有这层凝灰岩。这种凝灰岩局部有波痕, 在 Iron Mountain 之西还发现泥盆纪鱼的甲片 (Kinkel 等 1956)。

代表 Balaklala 流纹岩中层的侵入体在区中许多地方发现, 主要在区中心处流纹岩主体之下的绿岩中发现。在 Squaw Creek 之北通向 Mammoth 矿的公路上, 出露了产于枕状熔岩中的中粒斑晶流纹岩横切岩墙, 并且几乎所有 Copley 山-Spring Creek 地区的中粒斑晶流纹岩的小型长条岩体 (图 2 和 8B) 都是绿岩中的岩床或岩墙。它们的走向主为北东。围绕 Mule 山岩株南端的非常连续的中层型岩石的板状岩席 (图 2), 虽平行于叶理, 似乎应属岩床类体而非喷出岩席。

在 Kinkel 等人调查时, Mule 山岩株在纯地质的基础上被认为可能为侏罗纪, 与内华达造山运动联系, 而 Copley 和 Balaklala 则被认为属前晚中泥盆世。尽管 Kinkel 等 (1956) 和他们之前的 Graton (1910) 都注意到岩株的奥长花岗岩主相和 Balaklala 流纹岩在岩石学和化学性质上都很相似, 但他们都断言相似性是

偶然的, 在成因上并无联系。

最近, Mule 山岩株的 V/Pb 年龄和 K-Ar 年龄都测得了一致的结果为 400Ma 即早泥盆世 (Albers 等, 1981), Barker 等 (1979) 发现 Mule 山岩株奥长花岗岩与 Balaklala 流纹岩在稀土元素模式上非常一致。这些发现与上述其他相似性一起, 说明岩株是“Balaklala 喷出的高硅英安岩和凝灰岩的深成对应物” (Barker 等 1979)。从年龄、野外关系和化学及地球化学方面的相似性看来, 岩株不仅基本与 Balaklala 中含矿层属于同成因, 而且也许更直接地与其下层和上层属于同成因。

喷发中心: Kinkel 等 (1956) 定出了两个 Balaklala 流纹岩硅质岩石的喷发中心, 并推测在本区中还有几个 Balaklala 喷发中心。没有发现 Copley 绿岩的喷发中心。

最明显的喷发中心由 Mammoth 矿之西以 Mammoth Butte 为中心的巨厚 Balaklala 流纹岩上部粗粒斑晶层为标志。上层主体厚约 425m, 大致为卵形, 直径 2.5km, 向南西方延展并狭缩, 长约 7km。Kinkel 等 (1956) 认为 Mammoth Butte 区流纹岩的主体是一个火山穹丘, 并断言主火山口在 Uncle Sam 金矿附近粗斑晶流纹岩形成直立岩墙、透镜体和网脉, 并主要侵入了非斑状下层 Balaklala 流纹岩的地方。不论主喷发口是正位于火山穹丘主体之下, 还是在其北东 1-2km 处 (现在看来这种可能性较大), 今天看来这个中心不仅是 Balaklala 火山岩上层的主源, 也是下层的主源, 而且还是中层的重要源。这个结论的根据, 就是下层和中层在 Mammoth Butte 周围都很厚并会有大量粗粒和细粒火山碎屑岩, 并且都围绕 Balaklala 上层火山穹丘北侧形成弧状带 (图 8A 和 B)。Balaklala 中层形成宽的内弧带, 下层形成外弧带。火山穹丘南侧邻接山姆大叔断层, 断层以南, 下层和中层的露头带在断层附近由东北东转为正东。

Kinkel 等 (1956) 注意到硅质岩流和火山碎屑岩在区中到处分布, 从硅质岩流和粗粒火山碎屑岩一般不离开其源太远这一前提出发, 推断在西沙斯塔图区之内必然还有其它火山口, 包括矿带中可能有的几个火山口。可是在矿带之内除了山姆大叔-Mammoth Butte 区有一个较大的喷发口之外, 还未测定到其它的。

Reed (1977, 1984) 根据金刚石岩心的详细研究, 断言在 Keystone 矿附近有二至三个较小火山穹丘, 这就增加了 Kinkel 等推论的可信程度。我们认为在

① 英制长度单位, 1 英里 (mile) = 1.609km

Iron Mountain之西有一较大的喷发中心(图8C和D),它是一块直径几百米出露不好的粗斑晶上层流纹岩。这一结论的根据是由下层、中层和上层的露头组成的直径3-5km的大致放射状和弧形,围绕上述的粗斑晶流纹岩。Balaklala 下层和 中层在这里较厚,上层不厚,它在 Stowell 矿以南缺失了约3.5km宽之后又出露。另外, Iron Mountain 块状硫化物矿床紧邻在推测的喷发中心之东,这应是又一证据。

Kinkel等(1956)指出的另一些喷发中心位于块状硫化物矿带以外,已非本文主旨,不予详述。这里只说它们大部都是对的,特别是一个 Whiskeytown 以东的,一个 Whisheytown 南西约 3.5km 的,还有一个似乎是 Sacramento 河以东的。这三个都应是 Balaklala 中层中粒斑晶流纹岩的源,而 Sacramento 河以东的那个也许产生了下层物质。

图8D是由图8A至C得出的带推测性的图形。中间走廊是由大量出现的火山角砾岩划定的,这是在第1和2期由图上的三个3期喷发中心的前身产出的,也可能是由其它中心,例如上述的 Whiskeytown 之东和南西两个中心(图2)产出的。有一个可能的火口洼地构造,在山姆大叔断层之北由2期中粒斑晶流纹岩的大致圆形露头所显示。图上3期喷发中心都沿主角砾岩带分布。最有意义的可能是三个最大矿床群与3期粗斑晶喷发中心的空间联系,因为块状硫化物矿化发生在2期喷发事件的晚期。2期中粒斑晶流纹岩虽然分布范围要广得多,但除了3期中心的影响范围以外,并不会产生有价值的块状硫化物矿床。

Kennett 组

主由流纹岩碎屑组成、含有石英斑晶碎屑的凝灰岩或凝灰质砂岩,形成 Balaklala 流纹岩与其上覆下或中泥盆统 Kennett 组之间的过渡层。Kinhel 等(1956)把这层火山碎屑沉积岩划为 Balaklala 流纹岩的最上层,厚可达 90m。在其顶部附近有页岩夹层,其上有黑色、硅质、碳质、较薄层页岩,局部砂质并风化成灰色。这种燧石质页岩和局部夹含的火山碎屑层和富黄铁矿层组成了西沙斯塔 Kennett 组下部的主体。这种无化石燧石质页岩有时含有象放射虫的化石,并且总的面貌象是较深水中沉积的,可能在火山弧的边缘。但是在剖面较高处它被局部富含珊瑚的浅灰色灰岩所覆盖,灰岩说明为浅水沉积。燧石质页岩和其上覆灰岩的沉积环境看来似乎不相容,除非它们的地层层位曾受某种扰动,或者沉降之后紧接着在 Kennett 期间突然上升。

Kennett 燧石质页岩大部作窄带状分布于下伏 Balaklala 流纹岩和上覆 Bragdon 组之间。这些带在矿

区以西和在 Iron Mountain 纬度之北相当连续,而在矿区之东例如 Slaughterhouse 岛等处零星出露。这些带中页岩的显著特点就是在很大比例的露头中都严重扭曲(图6B)。褶皱一般幅度很小,最大几英尺。图7K和L示 Slaughterhouse 岛的层理极点分散情况,与 Copley 山域的 F₁褶皱相一致。Kinkel 等(1956)虽然认识到一些可能是 Kennett 沉积物沉积时的同生滑塌和滑动构造现象,可是又认为介于下伏火山岩和上覆 Bragdon 页岩之间的强烈揉皱的 Kennett 页岩可能曾是一个强烈扰动平面,在褶皱期间有相当大的运动沿它发生。Albers (1964)断言,有一个由高度变形的 Kennett 页岩所标志的逆断层介于 Bragdon 与下伏的火山岩之间。这一结论主要根据是 Bragdon 沉积岩底部底界与层态之间的不调和,并且假定燧石页岩的变形一般是逆断层所致。

对至少某些变形情况还有另一种解释,认为沿岛弧边缘发生的软沉积物的较大规模的滑塌和滑动,可能是在 Kennett 时期发生。Kinkel 等(1956)所设想的一个由硅质火山岩组成的长条海底火山高地,可能在其中部很少或没有细碎屑物沉积,除了在小盆地中有。主要沉积作用发生在中部高地两侧深水洼坡上。在这种陡坡海底地体中,可能由地震所引起的软页状硅质沉积物大规模滑塌和滑动,可能是一种非常普遍的现象,导致了今天在火山弧两侧低处沉积物的变形。变形 Kennett 沉积物露头带之限于距弧的最远的地方,就是对于这一方案的支持。然而,如果 Slaughterhouse 岛的比较一致的构造形式(图7K和L)确是这种燧石页岩中变形样式的代表,我们就必须承认大多数褶皱都产于构造应力而非滑塌。

关于覆在假定为深水页岩之上的浅水 Kennett 灰岩,据 John H. Stewart (1984)的意见,解释为由无序的灰岩碎屑产在石灰质基质中组成的碎屑流沉积。Kennett 页岩与上覆灰岩之间在 Little Backbone Creek 与 Butcher Creek 之间山脊上所见的明显不整合,使人相信了这种可能性。可是在 Yinnett 组标准产地 Backbone Creek 和 Bohemotash 山,灰岩似乎整合覆在未揉皱的页岩之上。但是碎屑流沉积并不一定要破坏下伏沉积,因而碎屑流沉积概念依然能够成立。另一种解释,要求该地在 Balaklala 喷发活动停止之后很快沉降,这就形成深水环境而使燧石质页岩沉积,以后又很快上升形成浅水环境使灰岩沉积,要不然就是 Balaklala 流纹岩上部粗斑晶层是在深水中喷出的。这后一种解释的可能性很小。