

经济地质

80 卷 第四 期

美国

ECONOMIC GEOLOGY

and

the Bulletin of the Society of Economic Geologists

1985

(六月)

地 质 出 版 社

目 录

布什维尔德杂岩: 绪言和述评.....	(1)
布什维尔德杂岩体东部边缘岩石的野外关系和锆同位素系统分析.....	(8)
布什维尔德杂岩体边缘相岩石和岩床的铂族元素与金的含量.....	(32)
东部布什维尔德杂岩体之下的超镁铁岩岩床: 玻质古铜安山岩类母岩浆中早期底部堆积岩带的活动悬浮体.....	(42)
波希特斯勒斯以南布什维尔德杂岩体底部带和临界带中铬铁矿的结构及成分特征	(64)
Nietverdiend地区布什维尔德杂岩体中的铬铁矿.....	(84)
Swartkop铬矿山铬铁矿亚固相线再平衡反应的估计.....	(98)
东布什维尔德杂岩中Maandagshoek农场的含铂UG-2铬铁岩层的地质背景	(110)
布什维尔德杂岩体UG-2铬铁岩层中某些铂族元素的分布	(127)
西布什维尔德杂岩体中Merensky旋回单元的矿物学、岩石学和成因	(139)
布什维尔德杂岩中的洞穴与其附近正常的Merensky矿层之间的地球化学和氧化还原关系的探索性研究.....	(154)
北德兰士瓦: 波希特斯勒斯的Overysel地区底板岩石与板状矿层的相互作用	(165)
东布什维尔德杂岩体主带上部辉石标志层及其伴生岩石的组分垂向与横向变化的意义	(184)
布什维尔德杂岩体中不相容微量元素的行為	(191)
吕斯滕堡以北Bierkraal地区布什维尔德杂岩体最上部含钛磁铁矿层的不同矿物学特征和结构关系	(201)
东布什维尔德杂岩顶部带块状磁铁矿层及其围岩中钛磁铁矿的离溶特征.....	(218)
布什维尔德杂岩体中矿物的成层性: 空间上紧密排列的磁铁岩及富硅酸盐的夹层中磁铁矿Cr丰度的意义	(229)
东布什维尔德杂岩体磁铁矿层及其主岩中钛磁铁矿的地球化学.....	(241)
布什维尔德杂岩体顶部带内富钛磁铁矿层的性质和成因: 综合评述.....	(252)
布什维尔德杂岩中富铁超镁铁质伟晶岩不整合岩体的分布及主要地质特征.....	(266)
波希特斯勒斯地区的布什维尔德变质岩: 一个二阶段变质事件的证据.....	(283)
布什维尔德东南部Loskop坝区Rooiberg酸性熔岩的地球化学演化.....	(305)
布什维尔德杂岩体花斑状岩石的成因问题.....	(316)
布什维尔德杂岩Vergenoeg火山成因的萤石-赤铁矿矿床及伴生的火山碎屑岩套	(329)
波希特斯勒斯地区Zaaiplaats锡矿山含锡矿筒周围的地球化学分布型式及含矿流体的成因	(346)

布什维尔德杂岩：绪言和述评

G. von Gruenewaldt Martin R. Sharpe C. J. Hatton

布什维尔德杂岩及与之有关的矿产资源，是我们地球上一个重要的地质形体。它的各个矿化和非矿化层稳定而少变化地沿走向延展数十公里。它对许多火成岩石学原理的发展曾起过巨大影响(如Daly, 1928; Hall, 1932; Niggli 和 Lombaard, 1939; Wilson, 1953; Hess, 1960; Wager和Brown, 1968; Hunter, 1976; Hunter和Hamilton, 1978)。最近时期，出现了一些新的革命性的关于层状侵入体的结晶作用的概念，这些概念如双扩散对流作用、岩浆房中的密度分层、底部生长和层的侧向增生等。要想对这些概念进行全面的评，只有借助于对岩石类型及其间关系的详细了解，如本专辑中许多篇论文所提供的那些资料。然而，本专辑的首要目的并不在于验证火成岩石学新概念的正确性，而在于通过一系列的根据最新研究成果的文章，向读者介绍布什维尔德地质情况的复杂多样性。

我们曾经尽了很大努力想在本专辑中均衡地搜集一套文章，能够把各有关方面基本上都包括进去。但遗憾的是，有关该杂岩体某些方面的资料完全阙如，而另一些方面有些非常简单，有些又特别详细。这在一定程度上反映了资料的来源，因为这些论文大多数都是于1983年年底在比勒陀利亚大学布什维尔德讨论会上宣读的。因此，下文将要简要地列出布什维尔德的各项事件，以对本专辑论文中没有涉及的某些方面予以补充论述。为了便于读者了解所读论文在布什维尔德各事件的顺序中所占位置起见，本文附有一幅标有绝大多数文章位置的地质图(图1)和二幅地层剖面图(图2和3)。

布什维尔德杂岩位于德兰士瓦盆地之内，该盆地中沉积有12km厚的碎屑沉积岩和化学沉积岩层序(图2)。火山沉积是德兰士瓦层序中的重要组分(Batton, 1976; Tankard等, 1982)，包括Abel Erasmus山口熔岩、2,223Ma的Ongeluk熔岩和Machadodorp火山岩。德兰士瓦沉积的晚期为1.5km厚的Dullstroom熔岩，是酸性、玄武岩质和安山岩质熔岩流的间互层。该层之上为巨厚的中到酸性的Rooiberg群的火山岩，它是已

知最大的前寒武纪酸性火山岩层(Twist和French, 1984)。在Loskop坝区，这些酸性火山岩厚达3500m以上。Twist(1985)在此区进行的详细地球化学研究发现该区既有拉斑型岩石也有钙碱型岩石。火山岩的精确年龄尚未测知。Walraven(1985)所测的全岩Rb-Sr同位素年龄 $1,604 \pm 37\text{Ma}$ ，显然是过低了，这是由于损失了放射性 ^{87}Sr 。Twist(1985)在新鲜熔岩流单元1中的取样获得了较为接近实际的假等时线年龄 $\sim 1,970\text{Ma}$ ， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值(R_0)为0.706(R. E. Harmer和D. Twist, 未刊稿)。

由Abel Erasmus山口熔岩的喷出开始至布什维尔德花岗岩侵入为止的这一连续的岩浆作用，跨越了好几亿年(表1)。Rooiberg霏细岩的喷出和布什维尔德杂岩的层状岩的形成，都在此时间范围之内。

有许多类型的镁铁质岩床侵入德兰士瓦层序。其中有的是在布什维尔德杂岩层状岩套侵位之前侵入，可能这与德兰士瓦盆地的下沉相应(Sharpe和Snyman, 1980)，现在由角闪岩质前布什维尔德岩床岩套为代表(Sharpe, 1984)。其它世代的一些未经变质的与布什维尔德同期的岩床可能代表布什维尔德岩浆房中岩浆的一些支脉。这些岩床从橄榄岩(Sharpe和Hulbert, 1985)经过与底部带和临界带邻接的具骤冷结构的微辉石岩(Sharpe, 1978, 1981, 1982; Davies等, 1980; Cawthorn等, 1981; Cawthorn和Davies, 1983)，到与上临界带和主带邻接的辉长岩。Sharpe(1984)论述了镁铁质岩床侵入和变质的年代。德兰士瓦层序中全部岩床的总厚度可达2.5km，其分布面积比杂岩中层状岩石现在出露的面积要大得多(Sharpe, 1982)。

杂岩的研究者们一致同意在它的演化中包括两个主要的岩浆类型(Davies等, 1980; Cawthorn等, 1981; Sharpe, 1981, 1982; Irvine和Sharpe, 1982; Cawthorn和Davies, 1983; Sharpe和Irvine, 1983; Harmer和Sharpe, 1985)。鉴定这些岩浆类型的原始的衍生物，可借详细研究沿杂岩底部边界的岩石和底板中岩床的野外关系和地球化学性质来进行。这两种岩石

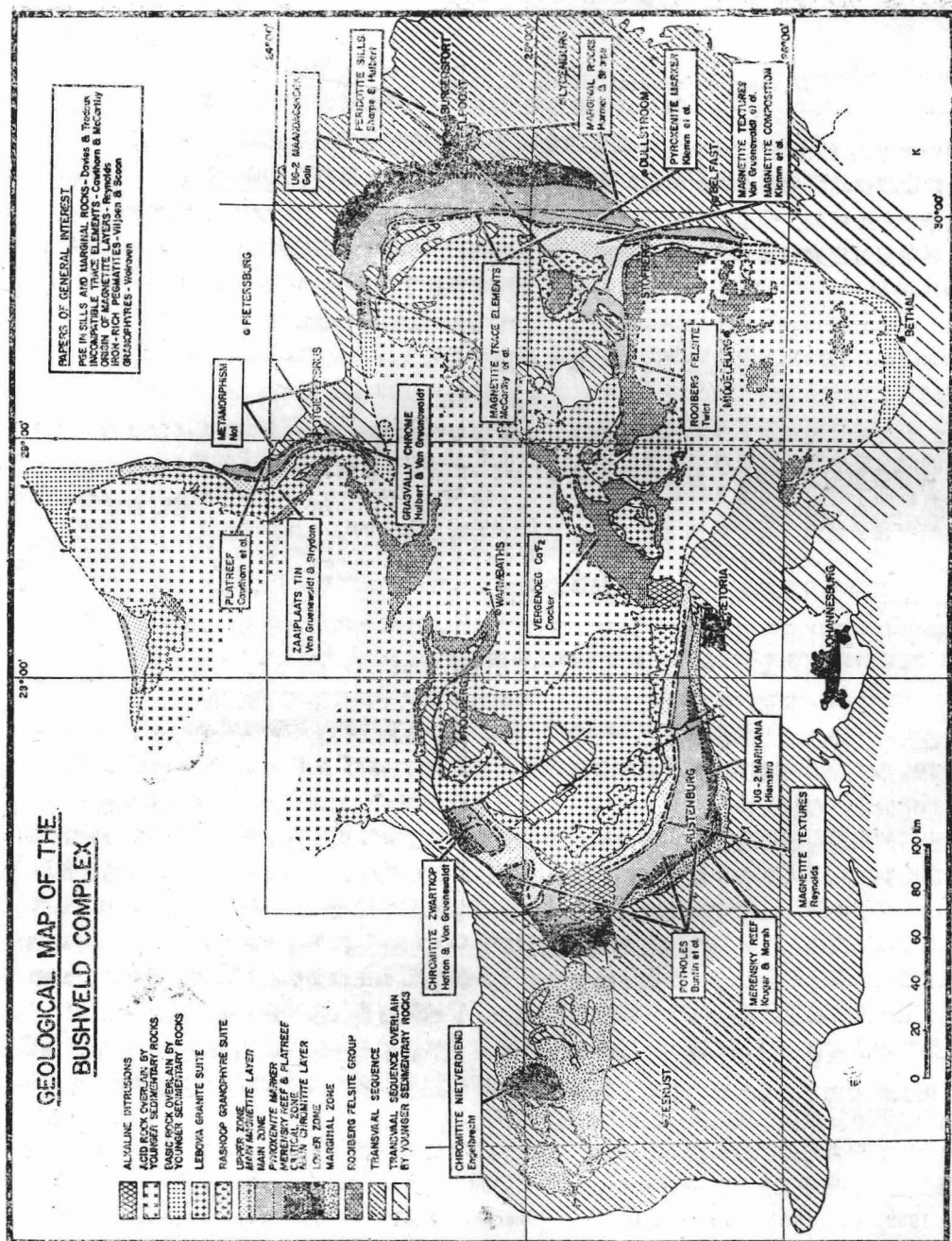


图 1 布什维尔德杂岩体地质图本文集中各篇章所述的位置

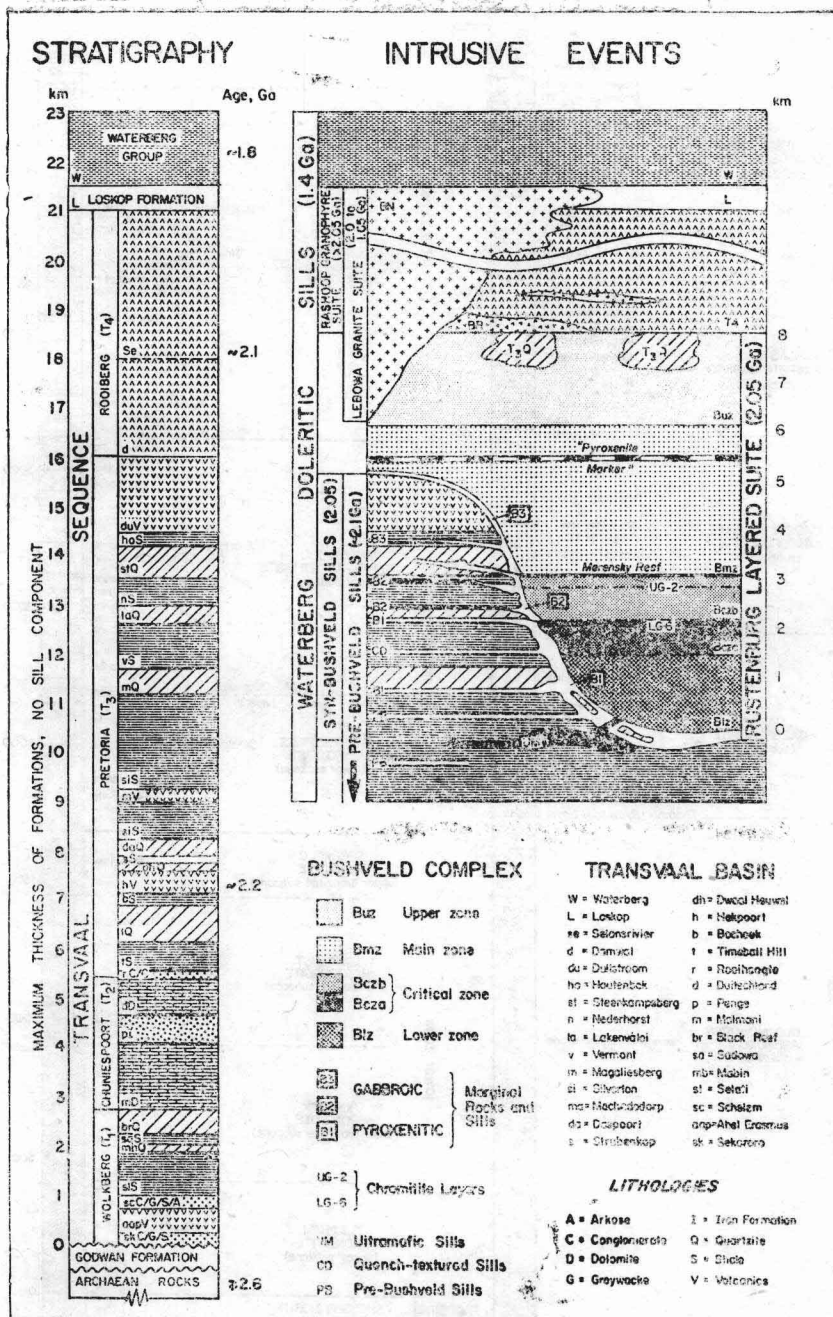


图 2 东部德兰士瓦地层柱状图示德兰士瓦层序、布什维尔德杂岩体和较年轻侵入岩之间的关系

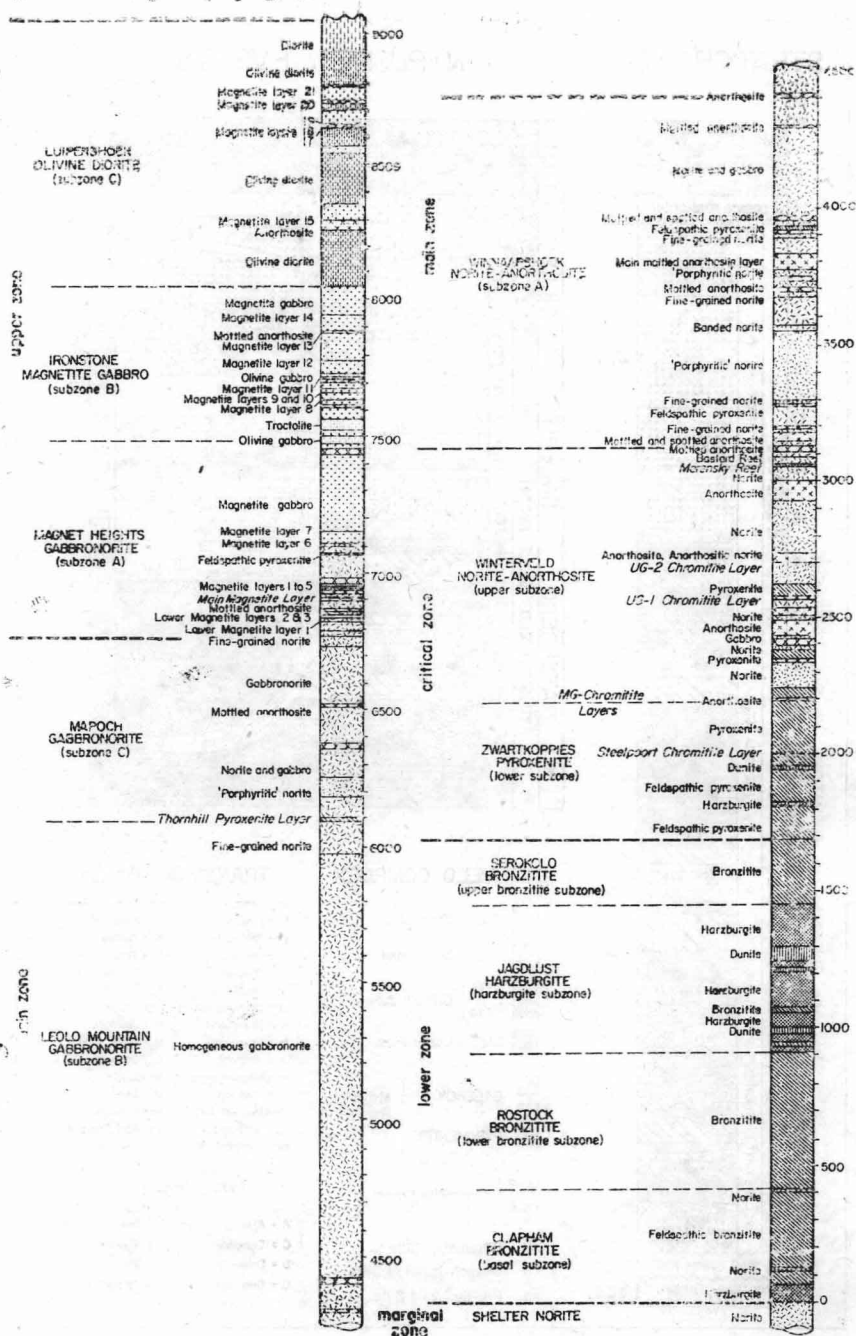


图 3 东部布什维尔德Rustenberg层状岩套的岩石地层柱状图
具经济价值的层和重要标志层用斜体表示

表 1 布什维尔德杂岩的划分和年代表

	正 式 的 划 分		年 龄 (Ma)	非 正 式 的 划 分	
布 什 维 尔 德 杂 岩	Lebowa 花岗岩套	Makhutso花岗岩 Nebo 花岗岩	1,670±30U/Pb① 2,010±20U/Pb②	布什维尔德花岗岩	
	Rasboop 花斑岩套	Stavoren 花斑岩	2,000±30U/Pb③	布什维尔德花斑岩	
	Rustenberg 层状岩套	Luipershoek 橄欖石閃长岩	$\left\{ \begin{array}{l} 2,057 \pm 24 \\ \text{Rb/Sr}⑤ \\ 2,058 \pm 155 \\ \text{Sm/Nd}⑥ \\ 2,050 \pm 22 \\ \text{Rb/Sr}④ \end{array} \right.$	顶部带	亚带C
		Ironstone 磁铁矿辉长岩			亚带B
		Magnet Heights 辉长苏长岩			亚带A
		Mapoch 辉长苏长岩		主 带	亚带C
		Leojo Mountain 辉长苏长岩		(Main	亚带B
		Winnaarshock 苏长-斜长岩		zone)	亚带A
		Winterveid 苏长-斜长岩		临界带	亚带B (上)
		Zwartkoppies 辉石岩		(Critical	亚带A (下)
		Serokojo 古铜辉石岩		Zone)	
		Iagdlust 方辉橄欖岩		底部带	亚带D
		Rostock 古铜辉石岩			亚带C
		Clapham 古铜辉石岩			亚带B
		Shajter 苏长岩			亚带A
	Marico 辉绿岩套		$\geq 2,050 \leq 2,224$	边缘带	
德 兰 士 瓦 层 序	Rooiberg 霏细岩群	Selonsrivier 组 Damwal 组	无可靠数据	Maruleng 型 Lydenburg 型	
	比勒陀利亚群	Dullstroom 玄武岩组 Hekpoort 安山岩组	无可靠数据 2,224±21Rb/Sr⑥	Rooiberg 霏细岩	
				Dullstroom 火山岩 ongeluk 火山岩	

①Coertze 等 (1978)

②E.A.Retief (1985): 锆石

③Faurie和VonGruenewaldt (1979)

④Hamilton (1977), 用 $\lambda^{87}\text{Rb}=1.42 \times 10^{-11} \text{年}^{-1}$

⑤M.R.Sharpe (未刊资料)

⑥Burget和Coertze (1975)

类型, 命名为U (超镁铁质岩) 和A (斜长岩质岩), 分别与其富辉石质 (U) 和富斜长石质 (A) 的岩石产物相关 (Irvine等, 1983)。虽然U₀和A₀的母岩浆未能在边缘岩套中找到代表, 但现有资料却证实了有从不同环境中产生的岩浆。U岩浆的成分是橄欖石玻质古铜安山岩质的, 富于SiO₂ (52—56%), MgO (12—16%), Cr (800—2,000ppm) 和不相容元素 (例如Rb 20—50ppm, Zr 150—400ppm)。它们的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) 年龄为2,050Ma, (Ro) 比值在0.703到0.705之间。相反, A衍生物的成分近于拉斑玄武岩 (SiO₂ = ~48—50%, MgO = 8—10%), 含不

相容元素和Cr均低。它们的R₀为0.707—0.708 (Harmer和Sharpe, 1985)。正在进行的锆同位素研究指出, 产生主带的A₀型母岩浆的R₀大于0.709。这两种岩浆类型的混合, 对于层状岩石的生成以及对于杂岩中铬铁矿床和贵金属矿床的生成, 都是非常重要的。

加入布什维尔德杂岩中的岩浆, 其年龄尚未详悉。根据锆同位素数据 (M.R.Sharpe, 未刊资料) 和稀土元素资料 (Sharpe和Gorton, 1984), 底部带是从以U组分为主的岩浆中结晶出来的。临界带的下部生成期间, A₀型岩浆的流入逐渐增加, 这从晶堆间斜长石量、R₀值和铬铁矿层的厚度都向上增加可

以证明 (Lee, 1981; Sharpe 和 Irvine, 1983)。边缘岩石从辉石岩质 (即以 U 为主) 转为辉长岩质 (即以 A 为主) MG 铬铁岩层, 标志着更大量 A₀ 的加入的层位。当杂岩演化到这个层位时, U 和 U + A 衍生的岩床周期性地侵入下伏的德兰士瓦岩石中——这可能是由于在底辟构造的生长期间, 由于底板岩石的不稳定性而导致的体积调整作用推挤出来的。有些在 U 型岩浆中悬浮着橄榄石晶体的岩床, 最后结晶而形成了 Burgersfort 区的橄榄岩岩床 (Sharpe 和 Hulbert, 1985)。

上临界带结晶作用的特点, 是频繁的矿物成分和 R₀ 值的倒转, 这表示了 A₀ 岩浆的流入 (M. R. Sharpe, N. M. Evensen 和 A. J. Naldrett, 未刊资料)。Merensky 矿层处 R₀ 的大量增高 (Kruger 和 Marsh, 1982) 指示了从一层 A₀ 型岩浆结晶出来的主带。最后一次大量岩浆的涌入, 可能是在主带结晶期中的辉石岩标志层 (Von Gruenewaldt, 1973; Molyneux, 1974)。

Rustenberg 层状岩套年龄 ~2,050 Ma, 这是从 Hamilton (1977) 的年龄值用 ^{87}Rb 衰变常数 $\lambda = 1.42 \times 10^{-11} \text{年}^{-1}$ 重新计算而得。它不整合地侵入于德兰士瓦层序的 Rooiberg 群酸性火山岩之下 (图2)。这套层状岩是否继续延伸到杂岩体中部之下面形成一个单岩盆, 尚不清楚 (Hall, 1932; Irvine 等, 1983), 但是据物探数据的重新解释, 说明该杂岩体分为好几个部分 (Cousins, 1959), 可能在深部联结起来成为一个大的岩浆房 (Sharpe 等, 1981)。三个主要部分是: (1) 西部布什维尔德, 包括西方远处的 Nietverdiend 区的层状镁铁岩 (Engelbrecht, 1985); (2) 东部布什维尔德, 其南部被 Karoo 沉积层所覆盖 (图1); (3) Potgietersrus 岩叶或北部布什维尔德。在这三部分中, 岩石类型的顺序大体相似, 说明供给这些岩浆房中的岩浆和分离结晶作用的情况是基本类似的。但是在细节上, 岩石类型的性质和顺序却又有很大不同 (除了上临界带和下主带的顺序之外)。在东部和西部布什维尔德之间, 这部分顺序的特别相似的程度, 使人想到如果不是在结晶作用的这段时间地下岩浆房是互相连通的话, 是不可能实现的。

Rustenberg 层状岩套在东部布什维尔德出露最好。因此, 第一次正式把层序划分为岩性单元的尝试 (南非地层委员会, 1980) 是根据东部布什维尔德层序进行的。这种划分法连同传统的分带, 都示于图3以供参考。

底部带的最好露头在东北部布什维尔德的所谓 Olifants 河河槽中, 这曾由 Cameron 描述 (1978)。它是一个 1,700 m 厚的由更迭的古铜辉石岩层、纯橄

岩层和方辉橄榄岩层组成的层序。西部布什维尔德 Pilanesberg 以西的底部带岩石类型层序 (Vermaak, 1970, 1976) 与远西部布什维尔德的 (Engelbrecht, 1985) 都是大体相似的。以上三个地区都没有铬铁岩层, 并且各种岩石类型中的铬铁矿的含量也低。与此相反, 在 Potgietersrus 以南的底部带层序, 则含有好几层发育良好的铬铁岩层, 其中有两层目前正在 Grasvalley 铬矿进行开采。Hulbert 和 Von Gruenewaldt (1985) 指出, 这些矿层中的铬铁矿的成分与大岩墙的铬铁矿相似, 它们所在的底部带岩石, 比东部和西部布什维尔德出露的最早期分异体含镁要高得多。他们认为这些铬铁岩层是由化学成分和氧逸度截然不同的岩浆 (U 和 A 型) 混合而成, 这个作用曾由 Sharpe 和 Irvine (1983) 用实验证实。Hatton 和 Gruenewaldt (1985) 认为类似的作用可能是临界带下部铬铁岩层的成因, 他们还曾试图根据硅酸盐-铬铁矿随着铬铁矿实际矿物量减少而进行再平衡, 封闭温度也随之系统地降低的现象, 计算铬铁岩层的固相线温度。无论 Hatton 和 Von Gruenewaldt 的计算, 还是 Engelbrecht 的计算, 都只涉及了临界岩石中的有限部分。为了更全面地了解东部布什维尔德杂岩体的临界带岩性以及其中所含的铬铁岩层, 读者可以参看 Cameron (1980, 1982) 的有关文章。

上临界带会有 UG-2 铬铁岩层中和 Merensky 矿层中具经济价值的铂族金属矿床。它们的地质环境以及其中铂族金属矿物分布的情况连同在 Platreef (Potgietersrus 部分) 的矿化作用, 由 Kinloch、McLaren 和 De Villiers、Mostert 等和 Gain 和 Mostert 在《经济地质》77 卷专集 (1982) 中加以描述了。在本期中, Gain 和 Hiemstra 提供详细的铂族元素分析数据, 用来解释 UG-2 层中铂族元素的异常富集现象及其特殊富集型式。Kruger 和 Marsh (1985) 又描述了西部布什维尔德的地质环境, 他们提出他们的岩石学和地球化学数据是符合于岩浆混合和扩散对流模式的。Buntin 等 (1985) 研究了正常的和洞穴式的 Merensky 矿层之间在地球化学关系和氧化还原电位关系的不同, 他们认为, 洞穴代表深成喷气孔的残余, 富于碳和硫的还原性液体在矿脉形成之前和形成期间通过这些气孔进入岩浆。

Platreef 中铂矿化的成因和性质与 Merensky 矿层和 UG-2 铬铁岩层中的迥然不同。虽然这种不整合矿脉中的岩石类型与上临界带中所见相似 (Wagner, 1929; Buchanan 等, 1981; Gain 和 Mostert, 1982), 但矿化作用可能与岩浆受围岩混染有关。Cawthorn 等 (1985) 研究了这种假说, 他们提出证据有力地说明

了矿脉被花岗岩物质大量混染。

主带的上覆岩石是比较均匀的(图3),其层序,包括顶部带,曾由Von Gruenewaldt (1973)和Molynieux (1974)加以记述。主带中重要的一层是所谓的辉石岩标准层。此层的成分反常现象,一般公认为是侵入期间大体积岩浆加入该层位的一种反映。但是,Klemm等(1985)沿几条切穿该层的路线研究了矿物成分,说明了辉石岩层和其共生岩石都切穿了等值线。这种现象用来证明了在岩浆结晶期间存在有成分梯度和/或温度梯度,而且晶堆组分比例的变化是源于一些外在因素例如岩浆房之上总压力的短期变化。

Cawthorn和McCarthy (1985)提出的不相容微量元素的数据,丝毫不能证明有新岩浆流入辉石岩标准层的层位。他们指出,这些数据一般说来可用以检查例如主带底部和顶部带顶部结晶岩浆的演化情况。

本专辑中有五篇文章谈到顶部带中磁铁矿的一些情况。Reynolds (1985)和Von Gruenewaldt等(1985)描述了一些独特的出溶现象,并认为这与钛磁铁矿成分和氧化条件的系统性变化有关。McCarthy等(1985)和Klemm等(1985)在他们的文章中集中叙述了磁铁矿的化学成分,并把他们的数据与磁铁矿层的一些可能的成因模式相联系,而关于成因模式则有Reynolds在其文中较详细地加以评述。

多种多样的粗粒不整合侵入的超镁铁岩体和基性伟晶岩体,是许多Rustenberg层状岩套地区的特点(Willemse, 1969)。除了东部布什维尔德的含铂镁铁纯橄岩岩筒(Cameron和Desborough, 1964; Schiffries, 1982; Stumpfl和Rucklidge, 1982)外,对于它们所知甚少。Viljone和Scoon (1985)关于一些富铁变种的分布的文章,对这一含糊不清的岩石产状问题提供了一些新知识。

有关布什维尔德杂岩的综合性论述,如果不提到壮观的变质晕及在底板岩石和层状岩序中变质沉积岩捕虏体里出现的各种变质矿物组合(Willemse, 1959; Willemse和Bensch, 1964; Willemse和Viljoen, 1970),那将是不完整的。Nell (1985)的关于

Potgietersrus区的变质晕的文章,使我们了解到变质晕中见到的多种多样的变质矿物组合及其对于计算杂岩侵位时围岩中的温度和压力条件的用途。

对于布什维尔德杂岩顶板中广泛存在的花斑岩的成因问题,有一些相矛盾的意见。几年前, Von Gruenewaldt (1968, 1972)提出这些岩石的成因是通过岩浆房顶板靠细岩的热量损失,使得靠细岩广泛熔融,这个假说有热流模式的支持(Irvine, 1970; Walraven, 1985)。但是Walraven根据野外关系指出,有些花斑岩不可能是这样形成的,因为他认为大多数花斑岩是在Rustenberg层状岩套之前生成,代表着与靠细岩同期的酸性岩浆的岩床状侵入作用。

Lebowa花岗岩套(布什维尔德花岗岩)代表布什维尔德杂岩岩浆活动的最后期。花岗岩于~2000Ma前侵位,成层状侵入体,具岩基规模,一般沿着或靠近镁铁岩与酸性顶板岩石的接触面分布,在杂岩体的大部分地段,Nebo花岗岩是一个均匀、粗粒,粉红至灰色的角闪石花岗岩。结构变种和成分变种很常见,尤其是沿侵入体的边缘部分,其中以Klipkloof花岗岩——细粒斑状花岗岩和Bobbejaankop花岗岩——淡色含黑云母花岗岩为最重要。花岗岩是布什维尔德杂岩体范围内重要的锡矿和萤石矿的来源(Crocker, 1979)。本专辑中介绍了两个与花岗岩有关的矿床。第一个是Crocker研究的Vergenoeg的独特的萤石矿床,他认为这是火山成因的。第二个是Von Gruenewaldt和Strydom (1985)简单总结了矿化作用的Zaaiplaats锡矿,他们提供了有关该矿含锡矿筒周围地球化学分散晕的一些新资料。

虽然本专辑中许多文章并未直接涉及布什维尔德杂岩的矿床,因而许多文章似乎越出了一本经济地质刊物的范围以外,但是,广泛地了解形成一个整体事件的各方面的事件,是会有助于我们更好地认识这个杂岩体中所包含的大量而多样的矿产的(Von Gruenewaldt, 1977)。正因如此,本刊编者提出把布什维尔德杂岩作为《经济地质》的一个专辑的主题。我们相信,这本选集会使读者能对形成布什维尔德杂岩的各种作用的总体有一个更好的了解。

译者 刘乃隆

布什维尔德杂岩体东部边缘岩 石的野外关系和锶同位素系统分析

R. E. Harmer和Martin R. Sharpe

摘 要

东部布什维尔德杂岩体出露完好的底部接触带,沿走向130km,并穿过9km的垂直剖面,绘制了1:10000和1:20000比例尺地图。边缘岩石和伴生岩床的野外关系、岩相学及地球化学有助于将它们分为两个主群。成分大致为辉石岩质的岩群,产于临界带中辉石岩亚带自底至顶的杂岩体的边缘。辉石岩群就产在这个层位之上。每个群都由一些紧密相关的岩石类型组成,其中大多数都有与之类似的岩床。第一群岩石(B1)包括辉石岩、苏长岩和橄榄岩,它们都可能具有骤冷结构。它们都含有斜方辉石($>En_{78}$)、斜长石($>An_{65}$)及铬铁矿,并有副矿物单斜辉石和黑云母。稀土元素模式大部分都强烈分离($Ce_N/Yb_N \sim 10$)并有40倍球粒陨石Ce的丰度。它们20.5亿年前的初始锶同位素比值落在0.7032至0.7057范围内,而Rb/Sr比值逼近0.2。辉长岩群分别由微晶质二辉石辉长岩(B2N和B3N)及粗粒的同类岩石(B2和B3)组成,它们分别毗邻上临界带和主带。矿物组合以斜长石($\sim An_{55}$)、单斜辉石及斜方辉石($\sim En_{63}$)为主,并有大量的磁铁矿和痕量的钛铁矿与黑云母。它们的稀土元素模式比B1岩石的分离要少。B2N和B2族岩石的 $Ce_N/Yb_N \sim 6$,Ce的丰度30倍于球粒陨石;B3N和B3族岩石的 $Ce_N/Yb_N \sim 3$,Ce的丰度6倍于球粒陨石,并有显著的Eu的正异常。20.5亿年前锶同位素的初始比值为0.706到0.708,而Rb/Sr的比值约是0.02。橄榄岩岩床的全岩成分和锶同位素的组成能成功地按照一种模式进行模拟,这种模式就是把橄榄石从一种初始锶同位素的比值(Ro)与过渡带的该比值(0.7056)相似的液体中分离出来。一部分这种富于橄榄石堆晶的液体,当同具有低 Ro (0.7034)的约达30%的辉石岩液体相混合时,就会形成一种具有橄榄岩岩床同位素组成的和化学成分特性的产物。

在辉石岩质和辉长岩质的边缘岩石中存在着初始锶比值的连续系列,说明这些边缘岩石代表了从至少两种具有不同的初始锶同位素比值特征的来源形成的混合物。无论“岩浆老化”还是地壳混染都被认为不能充分说明边缘岩石或其派生堆积岩的锶同位素特征。辉石岩质早期液体不同寻常的化学性质($SiO_2 \sim 55\%$, $MgO \sim 13\%$,加上高浓度的不相容元素)应当认为是原生的。

前 言

为:

布什维尔德杂岩体最初被认为是个单独的岩盆(Hall, 1932),然而现在认为它乃由四个主要的曾一度与中心岩浆源相关联的块段组成(Sharpe和Snyman, 1980)。每个块段至少有一个通道,估计位于正常厚度为7—9km的层序显著加厚的地方,这由重力数据可以看出。有七个这种推断的通道和更多的附庸岩体,它们与这些块段的相对位置是作系统性排列的(Sharpe等, 1981)。西部(W)和东部(E)块段内的镁铁质岩石呈10—40km宽的弧形带出露,沿走向长达400km(图1)。远西部的块段(FW)本来是侵蚀的残余,而130km长的波希特斯勒斯枝(P)是一条5—20km宽、向北走向的岩舌。构成层状序列的堆积岩,由Von Gruenewaldt和Walraven (1981)再细分

1.底部带(亚带A、B、C和D)。亚带A由长石质辉石岩组成,顶部为薄的苏长岩层。亚带B和D是单一的斜方辉石岩,而亚带C由纯橄岩—方辉橄岩—斜方辉石岩的旋回层组成。铬铁矿和单斜辉石都是副矿物。

2.临界带(亚带A和B)。亚带A主要由古铜岩与铬铁岩和稀少的方辉橄岩的岩层组成。斜长石在亚带B基底上的出现,形成了辉石岩、苏长岩、斜长岩及铬铁岩等岩层的层序。

3.主带(亚带A、B和C)。主带自上临界带Bastard旋回单元之上开始,其标志是堆积单斜辉石的出现和铬铁矿的消失。亚带A由二辉石辉长岩、辉

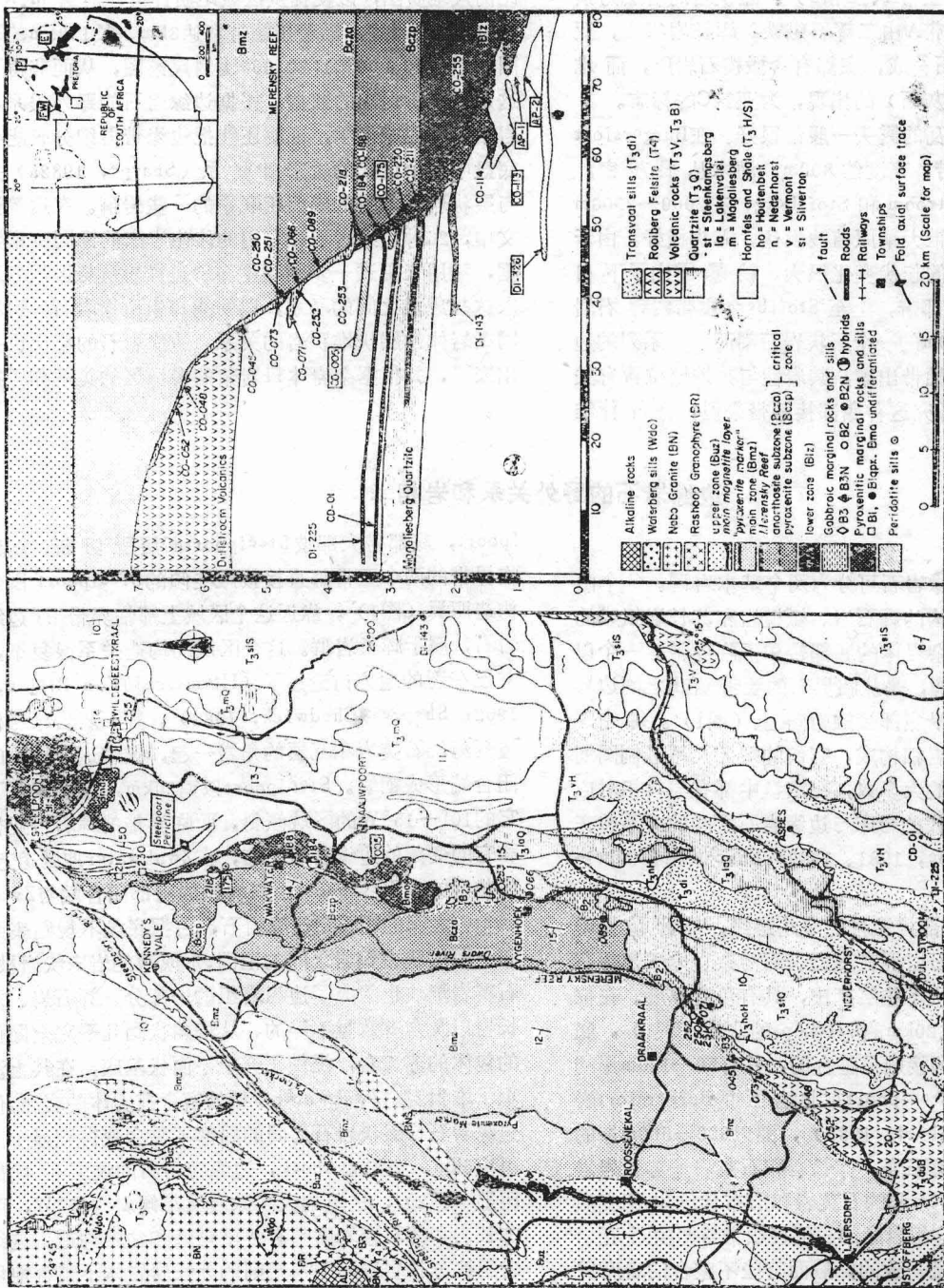


图 1 根据1:10,000比例尺图编制的Buiefontein隆起和Stoifberg之间

布什维尔德杂岩体边缘的详图

取样位置和代码都表示在地图上和理想化的横断面上，以说明它们与母

体边缘岩石群的关系

石岩和斜长岩连同堆积斜方辉石组成。在亚带B中, 镁铁质矿物有单斜辉石和倒易变辉石。堆积的斜方辉石再现在亚带C中辉石岩标准层之上。

4. 顶部带(亚带A、B和C)。磁铁岩的岩层为顶部带的特征。亚带A由二辉石磁铁矿辉长岩组成, 亚带B由类似的岩石构成, 底部有含橄榄石岩层, 而堆积橄榄石(和磷灰石)的出现, 为亚带C的标志。

东部德兰士瓦的露头一般都很好。在Burgersfort和Steelpoort一带, 高度约800m, 灌木丛很茂密, 而向南到Dullstroom和Stoffberg, 在2000—2300m高度的地方, 热带大草原植被发达, 露头极好。由于沿着底部接触带的起伏变化很大, 就暴露出了下自Burgersfort的底部带, 上至Stoffberg主带内辉石岩标准岩层之下500m的一个层状岩石剖面。一系列的边缘岩石沿底部接触带出露, 其岩性与其地层位置有关(图1)。对于研究这种底部接触带来说, 在布什维

尔德区再没有另一个比这里更理想的把不整合、地势起伏和露头结合起来的地方了。

在初步测量中, 做了面积约5500km²的1:50,000比例尺地质图, 以便提供区域地质评价。根据M.R. S.的航空照片, 沿着接触带宽达3km、长130km的范围, 以1:10,000和1:20,000比例尺绘图, 从而获得了这篇通讯所提出的数据。根据边缘岩石的野外关系、岩相学和地球化学, 证明还能把边缘带再细分成能与底盘中多个世代的岩床相联系(Sharpe, 1982a)并与层状岩石本身的成因相联系的一些岩群。在这篇论文中, 26种边缘岩石和它们的伴生岩床的锶同位素数据, 被用来更进一步阐明辉石岩边缘岩群与橄榄岩岩床这些成员之间的联系, 以便能探索边缘岩石诸岩群同杂岩体的层状堆积岩的关系。边缘岩石的年代也提出来了, 并根据杂岩体母岩浆的多源区的见解作了探讨。

边缘岩石的野外关系和岩相学

引言

杂岩体的边缘岩石可分为两个基本岩群。一个由部分具有骤冷结构的辉石岩、橄榄岩和苏长岩组成的辉石岩群, 邻接杂岩体的底部带和下临界带。一个以辉长岩为主的岩群, 是从临界带的亚带A和B之间边界线的层位开始, 沿底部接触带向上(图1)。每个群都由几个清楚的岩相构成, 它们的野外关系经制图划定, 而这些岩相的大多数, 在底盘中都有与其相对应的岩床。许多世代的岩床与边缘岩石之间的关系曾在别处讨论(Sharpe, 1981、1982b; Sharpe和Chadwick, 1982)。

图1所示沿底部接触带的南北路线, 最好地说明了野外关系。辉石岩群在底盘岩石与杂岩体下部辉石岩部分之间作盘状下垫层产出, 具有可变厚度。在位于Steelpoort以北20km的Driekop的北方(图1), 底部带与底盘之间的接触是整合的, 并有50—100m厚的边缘岩石。占据Steelpoort东北地区的Burgersfort岩钟(Sharpe和Halbert, 1985), 围以300—500m厚的假层状的横切的辉石岩、苏长岩和石英岩—苏长岩岩席组, 其中混有50m厚的石英岩和前布什维尔德变质基性岩的漂块。这组岩席的底部接触带与德兰士瓦岩石的层理基本上是一致的, 然而有些不整合的岩席贯穿进底盘中。底部带的层状古铜岩不整合地位于边缘岩石上, 并深深地切入其中, 由古铜岩填满凹陷。岩钟南界和北界邻接了不规则形状的苏长岩和辉石岩体, 它们分枝入于底盘并形成岩床(图1)。在Steel-

poort, 底部带大部被Steelpoort断层所切断, 所以临界带的两个亚带都直接接触陡倾的Steelpoort围斜构造西翼(图1)。靠近这个区域上部临界带的边缘岩石, 属于辉长岩群。这个区域的构造关系很复杂, 并已在别的地方讨论过了(Hiemstra和Von Biljon, 1962; Sharpe和Chadwick, 1982)。辉石岩岩床与构造变薄的石英岩和互层的角岩一起, 围绕这个构造的闭合端形成褶皱。Steelpoort以南20km, 底盘恢复了它的10°—15°W的区域倾斜, 而临界带的辉石岩亚带和它的变薄的边缘岩石层序, 在Zwakwater地区就变成整合的。Steelpoort围斜构造的南部闭合端与Zwakwater之间的辉石岩边缘岩石, 占据底盘不规则表面和上覆层状古铜岩之间的范围, 形成薄的岩床状岩枝。石英岩漂块也组成了边缘岩组的一部分。辉石岩、苏长岩以及含有数量不等的、从棱角状到几乎完全同化的包体的苏长岩, 提供了一个平面状基底, 在其上沉积了堆积岩。Zwakwater少量的富含捕虏体的岩席, 使边缘岩石与层状岩石之间的局部不整合变得明显了。再南5km, 在Vygenhoek, 边缘带岩石的纹层性质最明显(图2), 这里的大多数岩层都倾斜约15°W, 而苏长岩和辉石岩岩席都有浅平穹隆和盆地构造。这组岩层被苏长岩岩席和不规则的苏长岩岩体不整合地切穿了(苏长岩岩席由Van Rensburg制图, 1962)。

边缘岩石在岩性上主要的不连续性发生在临界带的亚带A和B之间的界线附近。一般邻接上临界带的细粒到中粒的辉长岩岩石侵入了辉石岩边缘岩石, 并

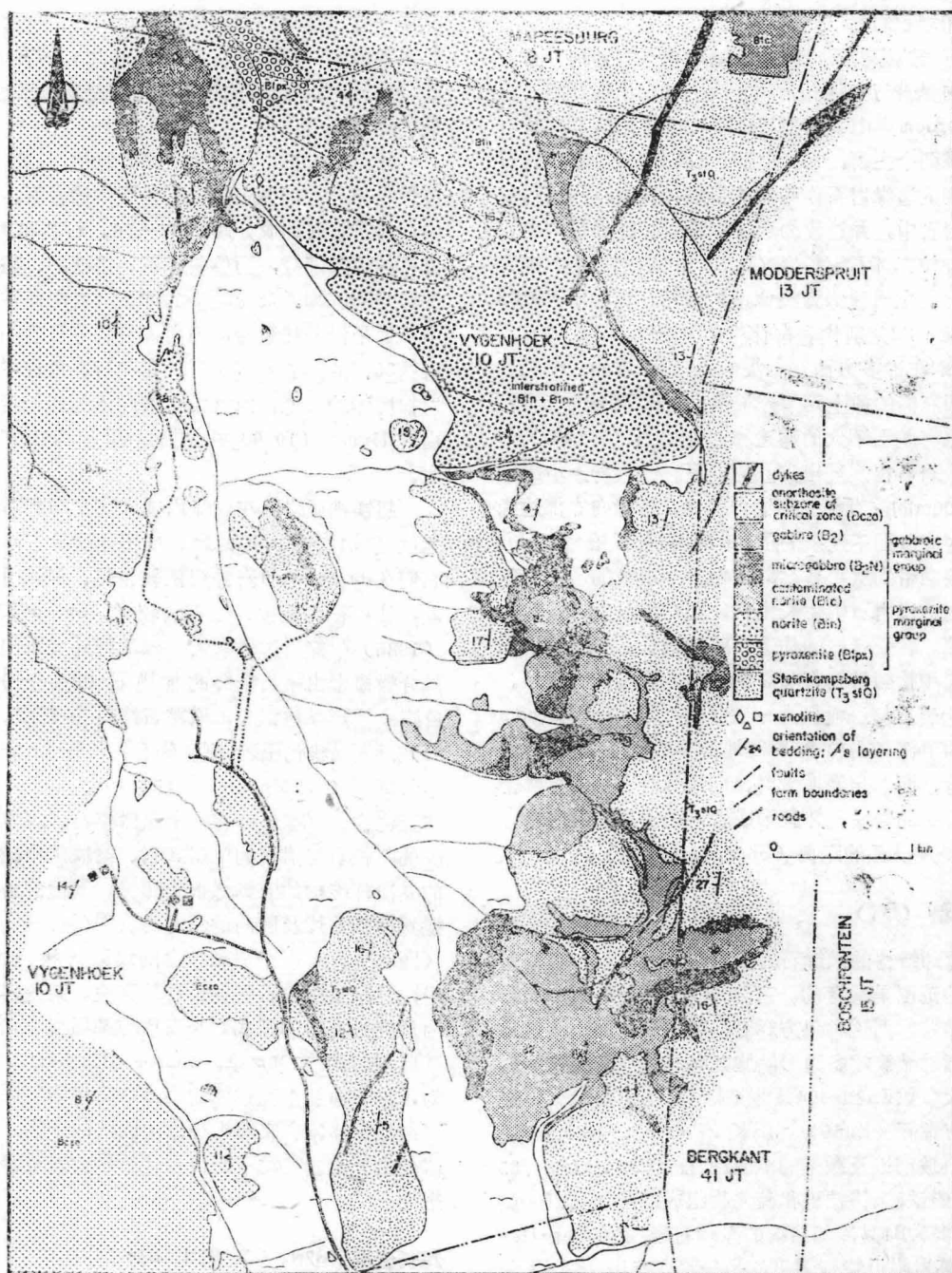


图 2 Vygenhoek地区辉石岩（北部）和辉长岩（南部）边缘岩石之间的接触带
苏长岩（B1n）和辉石岩（B1px）连同它们的细粒状冷却的、或许受混染的相应岩石（B1c），在北方形成一个波状起伏平缓的高原，而在Vygenhoek 10 JT向西倾斜。辉长岩群的边缘岩石（B2N和B2）不整合地切穿辉石岩群，并穿透底盘的石英岩，形成不规则的岩体，而再向南，就形成B2岩床和B2N边缘岩体。注意细粒状上临界带边缘岩石（B2N）是如何在Vygenhoek—Mareesburg边界上的辉石岩边缘群处产出的。上临界带岩石出露在西方

受其冷却(在图2的说明中描述)。再向北不远,下临界带的长石质辉石岩岩席以陡角度切穿了辉石岩边缘岩石和堆积岩。

辉石岩边缘岩石沿整个接触区域不规则地分布,从在下临界带与上临界带的界线上首次出现开始,直到Dullstroom火山岩的顶部(图1)。这些二辉石辉长岩可以绘成两个主群:1)细粒至隐晶变种,与底盘岩石和较年轻的边缘岩石作截然的接触;2)中粒型岩石,侵入细粒岩石中,并过渡为层状堆积岩。临界带的上亚带邻接细粒二辉石辉长岩(B2N)和其粗粒的对应岩石(B2)。主带边缘为类似型的岩石,名为B3N和B3(B1、B2、B3分别代表布什维尔德岩浆1、2、3)。B2N和B3N在许多方面互相类似,它们仅有的一个明显区别在于它们的稀土元素分布模式。B2和B3的二辉石辉长岩也有差别不大的构造和野外关系。它们与具邻接的层状岩石也表现出类似的关系。层状岩序中距接触带约100m的固有组分铬铁矿岩层,当趋向底部边缘时就成为分散而不连续的了。B2和B3岩石在粒度方面,自接触带到层状岩逐渐加粗。小规模的岩性层理从均匀的边缘岩石中生长出来,而它们很少有截然的相互接触。辉长岩群的构造,整体来看,与层状堆积岩的走向和接触带的方向之间的角度假整合有联系。如果层状岩石与底盘极为一致(例如,在Dullstroom火山岩的顶部(图1)和局部地沿接触带),则边缘带将很薄,而当角度增大时,则边缘岩石就沿接触带形成不规则的岩块,并且形成岩舌和岩床侵入底盘,许多都侵入很远的距离(Sharpe, 1982a)。

辉石岩群(B1)

具冷却结构的微辉石岩多数形成岩床,并且沿着接触带的范围是稀有的。它们含有大量的2—10mm斜方辉石晶粒,而这种斜方辉石晶粒在风化面上清楚地表现出辐射晶簇的多边形晶胞或毡状物质。在这些岩石中,大多数En80—94晶体是带状的(图3A),嵌于由斜方辉石(En66)、斜长石(An65—70)和脱玻的火山玻璃以及微量的单斜辉石(Ca:Mg:Fe=35:49:16)、磁铁矿、铬铁矿和硫化物组成的冷却晶束基质中。有许多种B1具冷却结构的微辉石岩;而在Magaliesberg石英岩附近特别常见的是一种含有梳状结构斜长石的粗粒型(图3B)。其它变种曾由Sharpe(1982a)详细地描述过了。辉石岩群中最常见的岩石是斜方辉石岩。它们作粗粒到中粒岩席产出,具中粒的边缘和稀有的细粒状岩枝,并可能有细粒到粗粒的2—10m厚的微弱或分散状的粒级旋回层理。有些岩席不同于辉石岩基底,其中含稀少的橄榄石,通常有1m厚的富含捕虏

体的底层,向上直至长石质辉石岩顶部。大多数斜方辉石岩含有50—90%的4—12mm长的En84—90晶粒,其中一些可能部分地变为细粒角闪石。这些岩石的基质主要由隙间的斜长石(An65—72)、石英、单斜辉石、黑云母及不透明的物质(主要是磁铁矿、铬铁矿、硫化物)组成。

辉石岩边缘岩群的其它成员包括:石英—苏长岩、苏长岩和含有70%底盘岩石包裹体的岩石。在苏长岩中,斜方辉石的成分为En67—78。石英和黑云母是重要的组成部分,而单斜辉石、铬铁矿、磁铁矿和钛铁矿是副矿物。未受混染的苏长岩岩床通常产于底盘中,但是沿着接触带,则占优势的苏长岩的岩性是含有达60%的部分被同化了的石英岩、角岩或变质基性岩捕虏体的类型。象这类含捕虏体的苏长岩,类似于由Willemse(1959)首先描述的Hendriksplaats苏长岩。

超镁铁质岩石在底盘内或在底盘与辉石岩边缘组之间形成10—50m厚的岩床或不连续的透镜体(图2)它们在Burgersfort岩钟周围较常见,但这里露头很差,往南往北较少,但露头较好。Sharpe和Hulbert(1985)曾探讨过橄榄岩岩床的野外关系和成因。大部分橄榄岩由相当新鲜的橄榄石(Fo83—90)的半自形到他形晶粒组成,橄榄石被斜方辉石(En84—90)以嵌晶状包围着,副矿物有斜长石(An59—76)、单斜辉石(Ca:Mg:Fe=41:51:8)、黑云母、铬铁矿和硫化物。有些岩床有一个以橄榄石、斜方辉石及稀少的斜长石与附属的单斜辉石、铬铁矿和硫化物组成的具冷却结构的方辉橄榄岩边缘。其他的岩床还有橄榄石冷却碎片及隙间的斜方辉石和斜长石的冷却边缘(图3C)。有一个岩床包含网纹斑杂状结构的橄榄岩,具骸晶橄榄石和斜长石的共生。某些岩床分异成为从纯橄榄岩的基底到长石质方辉橄榄岩的顶部,其典型旋回约100m厚。Sharpe和Hulbert(1985)认为,见于德兰士瓦东部的大多数橄榄岩岩床都是橄榄石结晶悬浮体在底部带母液中固结的产物,这种母液体是由于构造变动不断自布什维尔德岩浆囊中排挤出来的。

辉长岩群(B2N、B2、B3N、B3)

按照定义,B2N和B2辉长岩只产在自临界带的亚带A和B之间交界处起直至Merensky矿层,而亚带A、B交界处的斜长石首先在层状岩石中形成堆积相。在这个层位以上,辉长岩边缘岩石都是B3N和B3(图1)。这两类在野外只按它们的地层位置来区分,并按B3—B3N型中的单斜辉石类和磁铁矿的实际矿物比例稍微

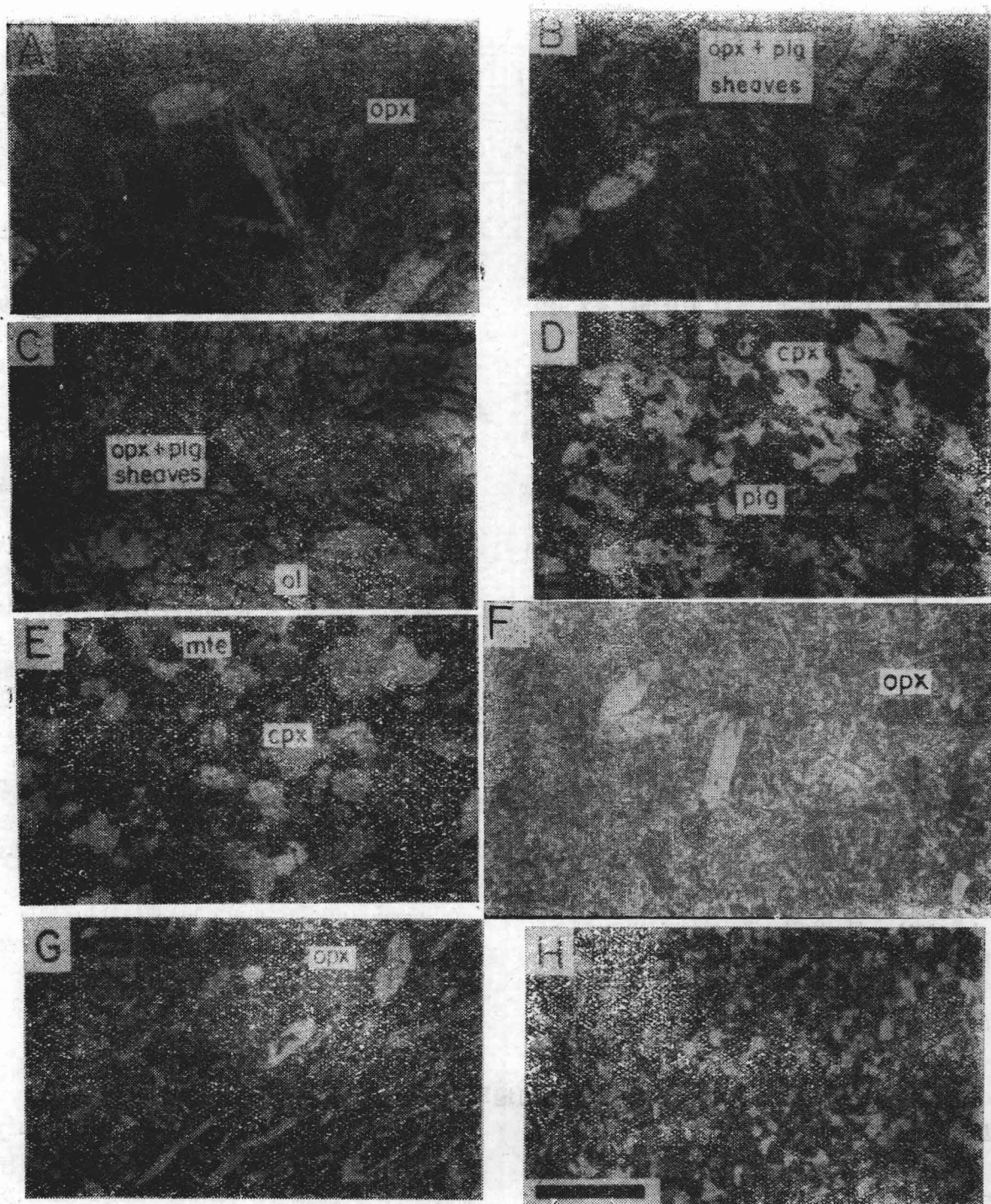


图 3 为这篇论文分析的一些岩石的显微照片

这些照片都按照同一比例尺，比例线段长为1mm。A—样品CO-230：自形斜方辉石晶粒具明显的分带，嵌在脱玻火山玻璃的基质中；B—样品DI-204：由斜长石和斜方辉石的冷却晶束包围着的半自形斜方辉石斑晶；C—样品AD-2：叉生的斜方辉石和斜长石的梳状体与晶束以及占据了局部已蛇纹石化和他形的橄榄石晶粒之间的空隙；D—样品CO-252：具有嵌晶状单斜辉石类和大量磁铁矿的二辉石B2辉石岩；E—样品CO-052：富含磁铁矿、含倒易变辉石和单斜辉石类的中粒辉长岩；F—样品DI-225：具有塔状终端的斜方辉石晶粒，散布于具有少量黑云母碎片的脱玻火山玻璃基质中；G—样品CO-114：骨架和漏斗形斜方辉石晶体溢生于由细粒斜方辉石、单斜辉石和斜长石构成的基质中，橄榄石和铬铁矿是副矿物；H—样品CO-250：富含磁铁矿和钛铁矿的微晶二辉石辉长岩

大些来区分。在基细粒的边缘岩石中，B₂N二辉石辉长岩是为量最多的，占辉长岩边缘群总量的约10%。B₃岩石较受局限，因为辉长岩边缘群的B₃N+B₃部分沿主带的底部接触带形成一个薄而断续的壳，与毗邻上临界带的分布广泛的B₂N和B₂相反。

在它们首先出现的层位上，B₂岩石形成不规则岩体，分枝到底盘岩石之中。在较高地层层位上，它们就在底盘岩石和层状岩石之间形成一种50—100m厚的表皮。薄岩床在所有层位上都很常见。B₂的全部露头都有细粒状B₂N的薄脉壁泥，而某些则含有B₂N、石英岩和角岩的捕虏体。这些岩石都缺乏组构，而由斜长石（An₅₂—58）、斜方辉石和单斜辉石（Ca:Mg:Fe = 41:40:19到45:37:18）以及石英、钛铁矿、磁铁矿和少量黑云母组成（图3D）。B₂矿物成分比B₂N更为原始，而粒度也较粗，这就说明它是堆积所成。

B₃群的厚度自北向南即地层上从下往上递减。B₃辉长岩比B₂的颗粒更粗，与底盘岩石形成混合岩，且通常与包体混杂在一起。它们是中粒（0.2—0.7mm）的二辉石到三辉石辉长岩，由斜长石（An₅₄—65）、单斜辉石（Ca:Mg:Fe = 40:40:14）、非出溶晶粒的斜方辉石（En₆₂—68）、倒易变辉石和大量磁铁矿组成。副组分包括黑云母，钾长石、石英和榍石（图3E）。

野外关系概要

边缘带的野外关系显示出临界带的辉石岩亚带和斜长岩亚带的侵位之间有一个主要的中断。辉长岩群的成员是在底盘发生变位之前侵入其中的，因为它们围绕着从Steelpoort围斜构造至Katkloof背斜之间各个底盘构造的闭合端发生了褶皱（Sharpe和Chardwick, 1982）。另一方面，临界带的亚带B和亚带A上部两者的结晶作用都发生在Steelpoort围斜构造之后，因为该构造的陡倾西翼被覆盖在Steelpoort以南下部铬铁岩层之上缓倾的堆积岩所超覆（Hiemstra和

Van Biljon, 1962; Cameron, 1971; Sharpe, 1981）B₂和B₂N的薄皮沿着上临界带的底部接触带产出，而这些岩石的渐狭岩舌侵入底盘并向下侵入与下临界带之下的辉石岩相邻接的边缘岩石中。这种关系在Vygenhoek地区重复出现（图2），并被解释为新岩浆加入临界带的亚带A顶部。

在层序的较高部位，在Merensky矿层的层位上，边缘带很复杂（图4）。B₂N和B₂岩石的捕虏体和矿层，与沿着上临界带的下伏基底接触带的产物类似，是较粗粒和较富于硫化物的。它们自下而上通过大约500m的接触带，自含En₆₅斜方辉石和2—3%的不透明物质的B₂二辉石辉长岩起，过渡到含倒易变辉石并含达7%的磁铁矿和钛铁矿的B₃辉长岩。关于Merensky矿脉之上新岩浆流入的野外证据是丰富的。B₃岩舌和更粗粒的辉长岩岩席，向下切穿了临界带上部200m厚的岩层，使铬铁岩岩层发生扰动并侵入底盘。边缘岩石受扰动极为剧烈，并形成大量露头，通常含有很多B₂N、B₃N和粗粒苏长岩的捕虏体。主带中缺乏在下伏的临界带中占优势的堆积铬铁矿。地球化学证据包括横跨临界带和主带间界面两边的斜方辉石中Mg/(Mg+Fe²⁺)比值增加约10%克分子及主岩的微量元素与同位素浓度的快速波动（Sharpe, 待刊稿）。B₂N和B₃N二辉石边缘辉长岩的地球化学和岩相学性质通过不连续面表现了很少变化，这种不一致性正是今后从事地球化学勘察的基础之一。明确的野外关系表明：B₂N和B₃N微辉长岩相应地各自形成B₂和B₃岩床的薄边缘，又在它们内部形成捕虏体，所以它们不可能是在形成薄边缘之后再沿基底接触带侵入的。B₂和B₃辉长岩结晶为杂岩很慢，比上临界带和主带的固结为慢。本文中提出的解释指出了上临界带和主带顶部带是从类似的母液体中产生，而B₂N和B₃N在某种程度上代表了骤冷的熔体。

全岩的地球化学

边缘岩石的组成

对于边缘岩石的分析采用附录中所述的技术来进行。其结果列在表1中。辉石岩边缘岩石的大多数样品（它们之中某些代表性数值已列在表1中），其MgO含量都在12—16重量%，SiO₂值很高，平均含量约53重量%。总碱量一般超过2.5重量%，其中K₂O值约为1%。Ni、Cr和不相容元素都有高值。橄榄岩样品与实际矿物成分橄榄石的丰度一致，富于MgO（26—35

重量%），而贫于SiO（41—49重量%）。除样品AP-2和CO-175之外，碱金属总量都少于1%。B₁和橄榄岩样品都具有显著数量的黑云母、高含量的K₂O和Rb以及高的(>0.1)Rb/Sr比值。在AFM（碱金属—铁—镁）图（图5）上，B₁岩套的岩石样品（CO-017、CO-114和DI-225都是其成员），形成了明显的趋势（17个样品的r = 0.93）。表1提供的超镁铁质岩石的分析已标绘在这个趋势的延长方向上。出自上临界带（B₂N和

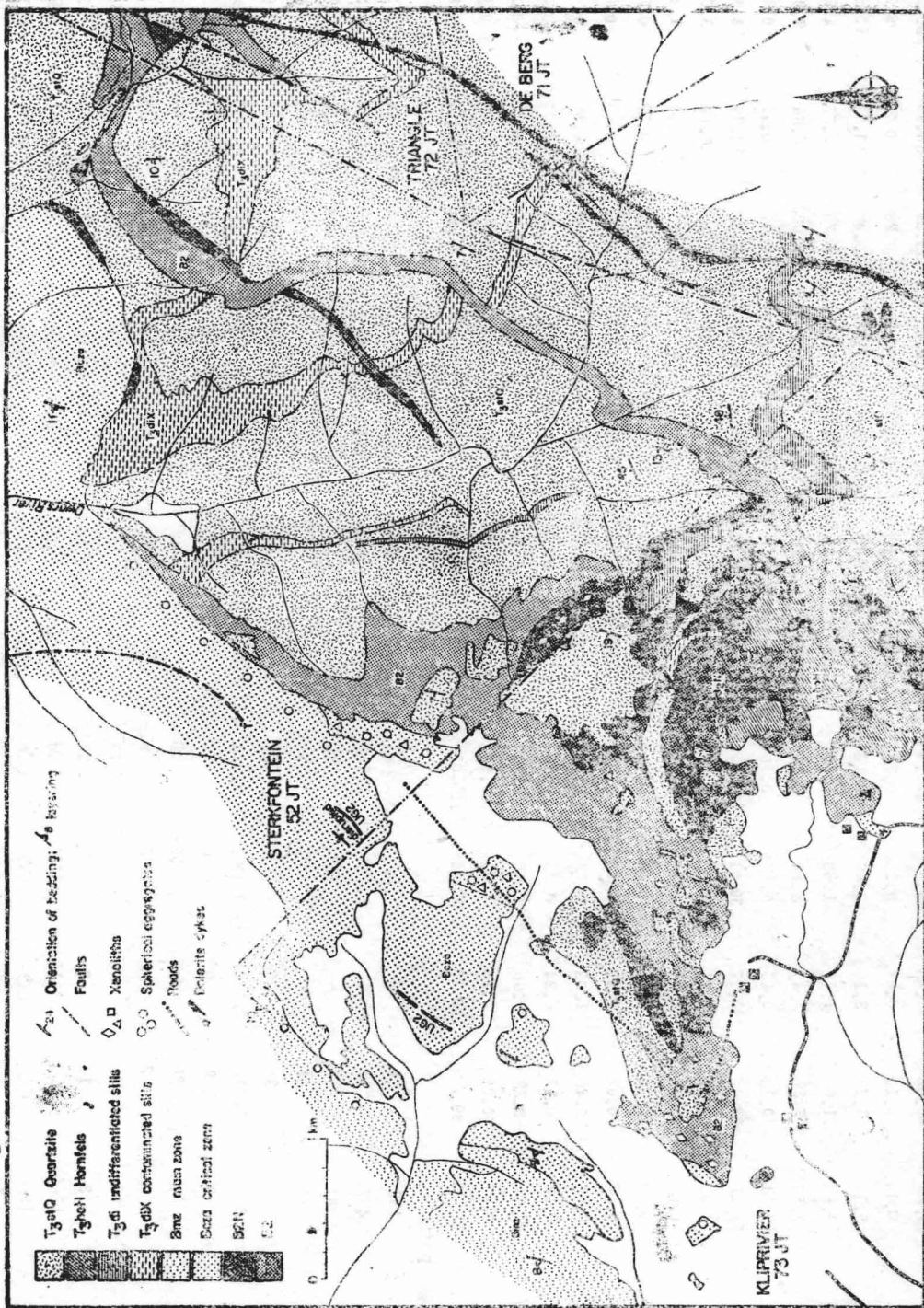


图 4 Kliprivier 73 JT 和 Sterkfontein 52 JT 上临界带和主带之间接触带的边缘关系

形成大部分底版岩石的 Sienkampsberg 石英岩，包含前布什维尔德角闪岩岩床 (T3d1) 和含石英达 80% 的混染岩床 (T3dix) 覆盖在石英岩上的 Houtenbek 组的角岩都是角闪化的，并且被杂岩变质为斜方辉石的岩群。一条 B2 辉长岩岩墙切穿了 Sienkampsberg 石英岩，并最终通到底盘中的三个岩盆。在 Sterkfontein 52 JT——Kliprivier 73 JT 边界上，上临界带中的一个角闪岩岩层不但翻转了，而且被主带中苏长质岩石听角脉化。主带与这个区域的临界带不整合，并向西倾斜约 10°。原图比例尺为 1:10,000