

442375

玄武岩漿

H. S. YODER, JR. 著

成因



地 質 出 版 社

中南政法學院

圖書館藏



玄武岩漿成因

H.S.YODER, JR. 著

翟 淳 马绍周 译
熊大和 校

地质出版社

内容简介

本书收集了1976年以前许多有关讨论玄武岩浆成因的地质学、岩石学、矿物学等的丰富资料。重点论述了地球内部母体物质的性质和熔融作用、过程，岩浆的聚积、分异和上升机制，岩浆的演化，熔融作用的构造物理学，岩浆活动的力能、周期性等。基本上反映了当前世界上研究玄武岩浆成因的水平。本书可供从事地质岩矿研究工作者、地质院校师生以及广大野外地质人员参考。

Generation of Basaltic Magma

H. S. YODER, JR.

GEOPHYSICAL LABORATORY

Carnegie Institution of Washington

Washington, D. C.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES

Washington, D. C. 1976

玄武岩浆成因

H. S. YODER, JR. 著

翟淳 马绍周 译

熊大和 校

地质部书刊编辑室编辑

责任编辑 马志先

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：850×1168¹/₃₂印张：8⁵/₁₆字数：217,000

1982年5月北京第一版·1982年5月北京第一次印刷

印数1—3,080册·定价1.55元

统一书号：15038·新 759

前 言

Arthur L. Day博士为促进地球的物理学研究，为国家科学院(NAS)提供了一笔遗产。因而组成了A. L. Day基金管理委员会^①，设置了A. L. Day奖金和讲座，并希望受奖者提出专著。当然，其内容应该是“A. L. Day博士研究领域的当代知识的概括与综合”的著作作为最好。

作者有幸被选拔委员会^②选为A. L. Day奖金和讲座的第一个接受者，于是作者就以自选的课题写这本书，这确实是可喜的事。作者很久以来，就打算花些时间来思考岩浆^③的形成过程。多数进行过的研究都是假定岩浆是存在的，并认为它们会运移和发生结晶作用，可是最终对岩浆的实际形成都很少涉及。

这个主要问题是要有足够的时间去分析资料和综合观点。我断续地用了两年多的时间，才写成了1975年5月5—9日在Dartmouth学院和1975年6月23—27日在华盛顿卡内基研究院地球物理实验室使用的完整讲演稿。作者感激Dartmouth学院地学系主任R. W. Decker教授组织的参观，并感谢学生们和全体同事们发人深省的提问和答疑。地球物理实验室同事们还进行了一次令人鼓舞的、关键性的意见听取会，会上对各种设想都展开了激烈的讨论。从他们自愿地承担一些所提出的研究问题，证实了他们的反应是很使人满意的。

① 基金管理委员会：W. W. Rubey, 主席；R. M. Goody, M. A. Tuve, J. T. Wilson.

② 选拔委员会：H. Friedman, 主席；J. G. Charney, A. Cox, J. R. Goldsmith, O. G. Villard.

③ 正如地质学家所使用的术语那样，岩浆可定义为：地球内天然产出的、活动的液体，其中可包含有悬浮的晶体或岩石碎屑以及溶解或离析的气体，而且它们可以形成结晶的岩石和玻璃，可以侵入或者象熔岩那样喷出。

本书直接写出了那些人们所希望了解的地球内岩浆起源处的玄武岩^①岩浆形成的广泛观点。

作者的目的是要把许多问题集中起来，进行理论分析和试验研究。很明显，作直接的野外研究，现时还不可能。但是，并不能认为在最近的将来仍是不可能的。由美国地质调查所（USGS）和能源研究与开发管理署（ERDA）开展的岩浆熔体开发规划（Magma Tap Program），在努力寻找迫切需要的能源上，可能会给予直接观察最小的辅助岩浆房的机会。对读者来说，很明显，这里的推论是很不肯定的，而且就是谨慎陈述的观点，有些也还是有争论的。如果这些观点都彼此相持不下，那么，企图促进这一课题的新研究的愿望，就会徒具虚名。

读者将可以得到在地球内关于岩浆的主要概念的基本印象。就象用设想的格架代替实体那样。假定的模式已为人们所公认。权威主义支配着视野，而每个论据的很关键性分析都受到鼓励。已确立的事实是极其少的，因而读者可连续提出问题“证据是什么？”。书中将一些有待评价的论点也列举出来了。一节有说服力的论据可能是另一节同等有力的反证。在著作里，不是所有的论据都加以叙述，有些论据省略了。可是注明了资料来源，因为有些论据的实验不精确或者是其假设现在认为无根据。

本书是用：什么？在哪里？如何？为什么？和什么时间产生岩浆等等问题组织起来的。讲演的内容包含关键性的实验参数和喷出到达地表的玄武岩成分^②的最普通岩浆形成原理。重点论述

① 玄武岩是一种镁铁质的喷发火成岩，主要由斜长石（通常为拉长石）和单斜辉石组成，其变种可能含有橄榄石、斜方辉石、霞石和石英，这些矿物可以单独存在、或是几种同时并存。这类岩石可以是玻璃状的、细粒的或斑状的。磷灰石和磁铁矿是常见的副矿物。玄武岩有时可侵入形成岩墙（dikes），然而，这种侵入的当量岩石，一般称为辉绿岩（粗玄岩）或辉长岩。一般玄武岩的平均化学成分，则见于Nackolds(1954)，Manson(1976)和Chayes(1975)的文献。

② 玄武岩和相关岩石（辉长岩、角闪岩和榴辉岩）约占地壳体积的42.5%（据Ronov和Yaroshevsky 1969, 49页，表7），他们所取地壳的基面为莫霍不连续面（M），

(a) 地球内部母体物质的性质和熔融作用的位置；(b) 熔融作用过程，包括热力的必要条件和来源；(c) 岩浆的积聚、分凝和上升的机制；(d) 岩浆演化的物理化学；(e) 熔融作用的构造物理学；(f) 岩浆活动力能学、周期性、持续时间。由于学生们在岩石学方面只有一般知识，因而，在一定程度上扩充了讲稿内容。

本书不打算讨论附属的即辅助的岩浆房及发生在那里的有关分异过程、喷发力学或火山产物的形态特征。因为这些课题已充分载于火山学和岩石学教科书中了。

就本书主题内容的广度来说是无可非议的。而作者显然不是讨论所有课题的专家。当然，也没有人具有这种能耐。那么只好对岩浆成因的许多令人振奋的事实进行认识 and 了解。

感谢许多人的劳动。M. Imlay小姐对文稿打字，并愉快而耐心地改正；A. D. Singer先生组织了打字、照相和许多插图编排；W. C. Hendrix先生绘制全部插图；D. Thomas小姐编辑了给国家科学院的抄本、汇集参考资料。初稿由P. M. Bell博士(1—6章)、B. Mysen博士和H. R. Naslund先生审阅。二稿的全部或部分由N. T. Arndt博士、F. Chayes博士、R. W. Dcker教授(9和10章)、J. S. Dickey教授、H. C. Heard博士(9章)、A. Hofmann博士、H. G. Huckenholz教授、T. N. Irvine博士、I. Kushiro博士、J. B. Lyons教授、A. R. McBirney教授、S. A. Morse教授、D. C. Presnall博士(6章)、E. Robertson博士、Jean-Guy Schilling教授、J. A. Tullis博士(9章)和D. Velde博士等人审阅。经过这些好心朋友们花费了大量的时间，作者才得到了这样一个完善的原稿。同这些和那些专家与内行的讨论，是非常之多的。恕我不可能一一列举。我以振奋的心情向他们表示感谢。正如每个作者了解的那样，用他们的知识写一本新课题的书是最值得令人学习的经验。对所有作出过贡献的人，对他们的帮助和教益表示感谢。

目 录

第一章 绪言	1
火山产物——一种新资源	1
必需的系统研究——爆炸火山	1
结晶岩浆房的观察——岩浆的运移	2
岩浆源模式种种	2
蚀丘/空心钟乳模式(3)地球物理模式(4)晶体	
粥模式(5)毕乌夫带模式(6)深成模式(7)	
深离模式(8)爆发火山道模式(9)	
结论	
第二章 原始物质	11
产生玄武岩浆的主要条件	11
母—子实验	11
实验假设(12)地表条件下玄武岩的平衡(14)	
物源的一般类型(16)	
玄武岩或辉长岩源	17
榴辉岩源——玄武岩的高压相当物	18
角闪岩源	19
橄榄石——是一个重要的岩源成分吗?	21
陨石源	22
陨石中的重要相(22)在高压下与橄榄石矛盾的相(24)	
陨石与橄榄岩相关吗?(25)	
上地幔的石榴石橄榄岩	27
石榴石橄榄岩的关键位置(28)石榴石 橄榄岩会产	
生玄武岩浆吗?(29)	
陨石不产生玄武岩浆	31
石榴石橄榄岩源的相平衡基础	33

钾来源于哪里?	34
石榴石橄榄岩与地震速度相适应吗?	36
物理参数的 Monte Carlo 试验	37
地幔的组成未予确定	39
假定石榴石橄榄岩是玄武岩的来源	39
第三章 熔融深度	41
原始地球的成因: 冷聚、熔体分异, 还是两者相连续 呢?	41
火山作用形成地壳	44
冲击、深部表面倒转和部分熔融	44
岩浆——是地球形成过程的残留物吗?	45
地震资料证明有辅助岩浆房	
低速带——是部分熔融的证据吗?	47
部分熔融带——实验证据	49
震波的衰变	50
总结	50
第四章 熔融作用	53
熔融机制	53
临界矿物的熔融作用	53
机制	56
应力释放	57
拉张(57) 压缩(58)	
在熔融曲线上热升极值	59
成分极点(59) 相变极点(60)	
对流上升	60
等熵上升(60) 等熔上升(61)	
扰动特性	62
热传导的扰动(62) 密度扰动(62)	
机械能转化为热能	66
逆掩断层(66) 消减板块(67) 增殖裂开(68)	

再生回输(69)潮汐散逸(69)	
成分变化	70
扩散作用(70)挥发分(72)其它机制(79)	
熔融作用的现象观	80
第五章 熔融作用需要的热能	81
熔化热焓	81
测量(82)原始的估计(82)	
矿物和岩石的熔融热焓	83
适合于端元矿物的值(83)玄武岩的模式系统(83)	
玄武岩的改进模式系统(85)榴辉岩的模式系统(86)	
石榴石橄榄岩的模式系统(87)	
熔融热焓的应用	88
局部热产物(89)绝热上升(93)	
第六章 熔融的物理化学制约	96
初始熔融移离方法	96
间歇熔融(96)部分熔融(98)后继熔融移离(99)	
重要的原理及问题	100
母体物质的相比例(100)母体物质的非凝聚性(102)	
熔体总量与温度的关系曲线(103)	
带状熔融	105
不平衡熔融	108
第七章 主要玄武岩浆的成分	109
火成岩石学的格局	109
玄武岩四面体	109
相平衡的说明	112
流动图表	116
“母体”岩浆	118
高压流动图表的需要	119
岩浆的分离	121
第八章 母体物质中的橄榄石	122
初熔体中的橄榄石	122

高压下,玄武岩中无橄榄石	122
玄武岩和石榴石橄榄岩的熔融关系	126
榴辉岩和石榴石橄榄岩的熔融关系	128
榴辉岩的熔融	128
斜方辉石的反应关系(129)橄榄石的反应关系(131)	
上升过程中玄武岩成分的变化	133
橄榄石——矛盾的还是互补的?	134
从团块得到的证据	135
在熔体中首先消失的相	136
稀土元素资料	137
能测定部分熔融的程度吗?(137)能测定不均匀性或相	
的比例吗?(140)石榴石橄榄岩中的稀土元素(146)	
一般论点和结论	146
第九章 熔融作用的构造物理学	148
初始熔融的位置	148
熔液的储积	149
熔液的均匀性	151
与冰川水的相似性	151
形变规律	152
熔体的位置	153
应力的反应(153)聚合(154)	
熔融作用中体积变化	155
体积增大(155)胀大、破裂或塑性流动?(156)地球的应力	
状态(157)晶体的粘着强度(158)	
从贮存源逸泄	158
塑性蔽障(159)时间相关性(159)“捏出”液体(160)	
应力条件下的可溶性(162)贮存源强度的降	
低(163)岩浆裂变(164)	
火山作用产生地震	165
第十章 能学与周期性	168
能学	168

能量的分配(168)地震能(170)	
引起岩浆上升的力	171
盖层挤压(171)浮力(173)粘度的重要性(173)	
周期性	175
缺少地质时代的玄武岩(175)火山空间(176)年	
代与空间相关吗?(178)	
对流热迁移模式	179
Joly-Cotter模式(179)Tikhonov等的模式(180)	
挥发物的作用	181
辅助储源的作用(183)	
潜在周期的逃逸机制	184
第十一章 概要综述	185
什么熔融产生了玄武岩浆?	185
熔融作用发生在何处?	186
熔融作用是如何开始的?	187
为什么玄武岩熔融体占优势?	188
什么因素确定了玄武岩的种类?	189
熔融是怎样形成和聚集的呢?	190
什么力引起岩浆释出呢?	191
为什么火山喷发是周期性的?	192
结论	192
附录: 换算系数	193
名词索引	195
体系索引	256

第一章 绪 言

火山产物——一种新资源

火山爆发是一个令人震惊而又可怕的事件，要想用语言把一次爆发全过程表达出来，几乎是不可能的。火山爆发的那些景象、厉声、震动和激情都给人留下了不同的、难以忘怀的印象。火山爆发是地质上的灾害。现代火山学的研究、知识的积累，就在于预防这种偶发事件造成的生命和财产的损失。那种由于火山爆发补充到地球表面的新物质的价值，只有很少一部份为人们所认识，有些火山灰可以形成很肥沃的土壤，甚致那些熔岩流，在适当的风化条件下，在几年内也可变得宜于耕种。对于人类来说，火山产物的确是一个重要的新资源。

必需的系统研究——爆炸火山

在火山学方面，目前仅致力于一些短暂的地震活动的研究，以期能预报火山爆发的地点、时间和爆发强度。遗憾的是，这些研究主要集中于那些静寂型火山（如夏威夷、基拉瓦）中。可是，为害最大的还是那种爆炸型火山（如加利福尼亚 Lassen-Peak）。因而迫切地需要在有人居住的地区。在另一次火山爆发之前，就着手组织对爆发型火山进行系统的研究。如在人口稠密地区附近的那些火山地点，特别是在美国西部（如圣·赫伦斯山脉，Crandell等1975），立即安装遥感或遥测仪器（如地震仪、地热计、倾斜仪、喷气计和照相机等等）给予监测。

结晶岩浆房的观察——岩浆的运移

在目前，正如人们对短暂的地震活动研究一样，重要的是必需对出现在地球表面上的大量均质熔岩的起因进行详细的考查。从大多数研究成果看来，人们完全可以推断，熔岩是从浅处（2—6公里）的岩浆储源而来的。当这些岩浆储源冷却之后，由于侵蚀而暴露出来。它们的空间分布可以根据仔细的野外调查得到——是一种地质的梗概。由熔融或部分熔融物质的结晶所形成的这些岩石，叫做侵入岩。也就是说，岩浆是在别处产生，而且不论其侵位的形式如何，都是发生过运移的。甚至大的岩基，常常是硅质的、多期的和无底的，也被视为侵入岩体，即岩浆是从它的起源处运移而来的。这个结论的证据是不充分的，只有少部分基性和超基性岩石是在一定的地方熔融的（Dickey, 1970; Menzies, 1973）。而多数硅质火成岩则显示出就地熔融的特征，也就是深熔作用产生的。或更一般地说，是再生作用（palingenesis）形成的。

岩浆源模式种种

由于资料的欠缺和所测参数可靠性低，致使研究者无法得出准确的结论，所以就提出了种种不同的岩浆源模式，其中有些模式还值得商榷。尽管他们表示对这个问题有必要进一步研究。因而要对这些岩浆形成的模式提出评述，却是不妥当的事。读者要记住。之所以提出这些模式，不是由于别的什么原因。仅仅是为了说明那些有待于解决的问题。详细的批评，对作者来说是不适宜的。但是读者不要因此而气馁，对模式的评论是为了引起读者科学上的进取心，并为以后的设想提供依据。

蚀丘/空心钟乳模式 (balloon/soda-straw model)

图 1—1 所示的模式，是描述岩浆源区的最简单的模式之一。

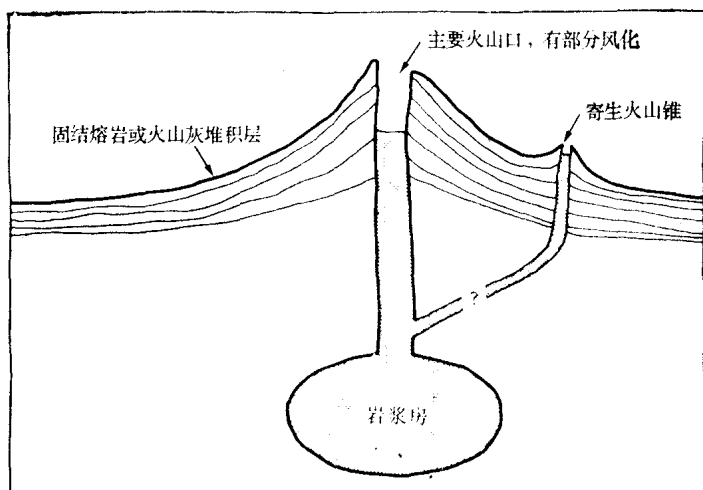


图 1—1 一个典型的火山剖面图
(依照Rogers和Adams, 1966, 159页, 图8-3)。岩浆房的形状、大小及位置不清楚

这个“蚀丘/空心钟乳”模式，毫无疑问是每个初学地质的人都要了解的，它表示一个热源点和椭球形的等温线^①。尽管Rogers和Adams (1966, 159页, 图8—3) 指出，其形状、大小以及位置一般尚不知道，但其设想是有意义的。例如，如果火山口的直径为1公里，那么岩浆房大约就在11公里的极点之下，椭圆形的岩浆房体积大约有90立方公里。这就足以容纳体积为0.1立方公里的900个熔岩流。蕴藏在岩浆房中的热能，大约为 42×10^{26} 尔格。五倍于一个现在所知的大多数爆炸型火山所喷发的总热能^②。在无再充填作用发生时，可以假定岩浆会随着时间的变化而分异殆尽。所以，在地质时代的发展期间，岩浆房显然是不会产生大

- Menard (1969, 138页) 作了一个相似的模式，它有着更近于球状的岩浆房，且位置更深，恰好在软流圈之上，是一个相当长的“空心钟乳”。
- 根据 $\Delta E = V \cdot \rho (C_p \Delta T + \Delta H_m)$ ，式中 $V = 90 \times 10^{15}$ 立方厘米 $\rho = 2.78$ 克/立方厘米， $\Delta T = 1250^\circ\text{C}$ ， $\Delta H_m = 87.5$ 卡/克， $C_p = 0.25$ 卡/克， C (1卡 = 4.186×10^7 尔格)。

量均质岩浆的。每次移离后的连续倒塌，能使岩浆房完全耗尽吗？或者这些液体会分布在塑性海绵晶体之间而被压出吗？是什么力使岩浆上升进入通道的呢？人们还会问：“岩浆房的边界线是什么？”是一根等温线、固相线、混合线、构造不连续、固相变化、扩散极限，还是其他一些有限参数呢？在主要火山口和寄生火山锥不同水平上，岩浆的密度不同。在寄生火山锥中或许含有更多的晶体，所以其平均密度较大。

地球物理模式

图1—2是Eaton和Murata (1960) 根据夏威夷的地球物理资料所作的很概略的一个模式。其形成的深度是由基拉瓦的最深地震群资料推得的。

Eaton和Murata认为：“这种震动的出现，显然是由于岩浆的聚积并补给地下通道系统造成的……”。箭头表示岩浆流入空穴或

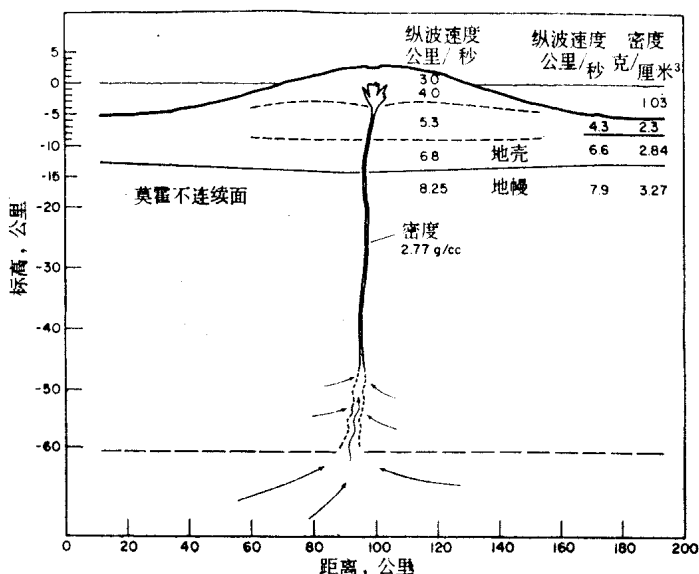


图 1—2 按Eaton和Murata (1960, 930页, 图5) 理想的夏威夷火山剖面图

进入有渗透性和孔隙度较高地带的方向，如果在这样的深处，有空穴或孔隙存在的话。作者强调，地震的诱因是岩浆运动，而与

岩浆的形成和地震能量的释放并无关系。既没有指出岩浆源，对热状态也没有叙述。

晶体粥模式 (crystal-mush model)

图 1—3 是威利 (Wyllie, 1970, 6 页, 图 1), 据 Green 和 Ringwood (1967, 164—167 页) 的描述绘制的模式。这个模式至少可以说明两个主要的概念。首先, 箭头表示从一个未知源产生的晶-液粥, 并假定其平均密度低于它产生层位的密度。问题在于从周围岩石中产生并向上运移的晶体粥内晶液的比率。运移速度是什么? 压力释放与冷却速度能补偿吗? 其次是晶-液粥中

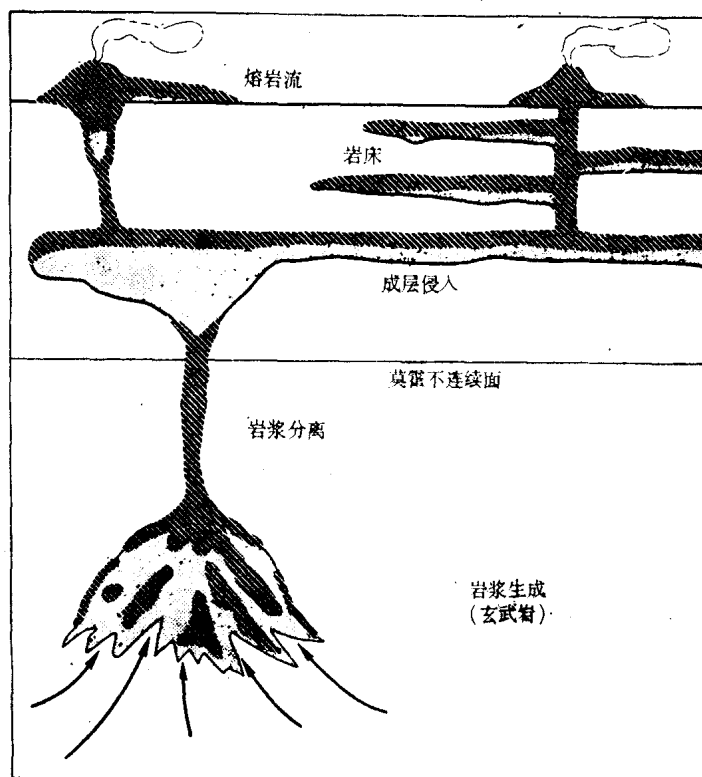


图 1—3 是由于地幔的底辟上升引起的岩浆形成示意图 (按 Wyllie, 1970, 6 页, 图 1)。点区为结晶的超镁铁物质; 暗色区为填隙的基性液体或结晶玄武岩或辉长岩

液体的深部分离。要求液体分离时不受化学作用制约。而且Wyllie还假定玄武质的液体是不考虑其分离深度的。另一方面，液体分离过程，主要受物理制约。在剪切带或低密度层中，可能产生深部分离。

毕乌夫带模式 (benioof-zone model)

图1—4为Coats(1962)所发展的岩浆源区的很理想的一个模式，是当代板块构造理论最早期一个清晰的图。他强调毕乌夫带是岩浆产生的一个主要环境 (Benioff, 1954)。Coats认为有一个橄榄岩带，就在100公里处，包含有玄武岩、橄榄玄武岩、榴辉岩或是不知成因的玻璃物质“囊”。它们重熔而产生玄武质熔浆，或者加进由逆掩断层带来的水和物质之后产生安山岩。壳层物质加上喷出玄武岩浆的量决定了沿着玄武岩—安山岩一流纹岩方向“分异”的量。Coats并没有详述玄武岩成分的熔浆原先是怎样熔融的。到底是什么物理化学条件支配着产生同样岩浆分异趋向而不顾岩浆的物源呢？这个模式还表明有垂直延长的辅助岩浆房，但是对其存在和延伸的原因却没有说明。这种长形状态是底辟还是长期同化围岩的结果呢？这个模式表明玄武岩浆是起源于一个狭窄的深度范围内。下一个要讨论的模式正与此相反。

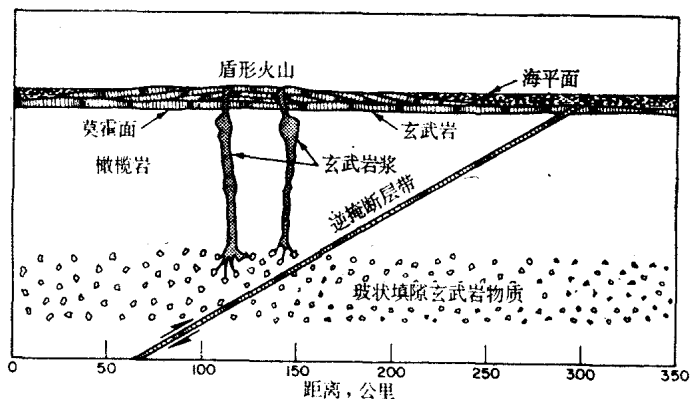


图1—4 Coats(1962, 107页, 图9)的一般岛弧的地壳和上地幔的剖面图。
仅示发育的第一阶段