

矿田与大陆风化

[法] J·C·萨玛玛著



矿田与大陆风化

— 限 表

章锦统 胡明安 高怀忠 程小林 周宗桂 潘仲华
章传玲 张德会 徐启东 伍 刚 李鹏飞 译
蒋明霞 夏卫华 校

中国地质大学出版社

内 容 提 要

本书是一本系统论述大陆风化作用的理论与实例的专著。书中根据风化前原岩中含矿物质的富集程度,将风化作用区分为矿床、低品位矿化岩石和正常岩石的风化作用,分别对铜、镍、铁、锰、铀的次生富集作用,与岩溶有关的铅锌、萤石矿床,以及风化镍、铀、铝等矿床,结合典型实例进行了深入研究,对大陆风化作用的控制因素及其与成矿的关系作了详尽的分析。

本书内容充实,实际资料丰富,涉及矿床学、矿物学、地球化学、热力学和土壤学等广阔领域,既具广博深厚的理论基础,又密切联系找矿勘探实际。

本书适用于从事矿床学、地球化学工作的研究人员和找矿勘探人员,以及高等院校矿床、地球化学等专业的师生。

Ore Fields and Continental Weathering

J. C. Samama

Van Nostrand Reinhold

(1987)

矿田与大陆风化

章锦统 胡明安 等译

蒋明霞 夏卫华 校

责任编辑 赵福堂

责任校对 熊华珍

*

中国地质大学出版社出版

(武汉市喻家山)

湖北省人民大垸印刷厂印刷 湖北省新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 15.375 字数 390 千字

1991年6月第1版 1991年6月第1次印刷

印数 1—1500册

ISBN 7-5625-0501-2/P·167

定价: 5.95元

序

由法国著名矿床学家 J. C. Samama 编著的“矿田与大陆风化”一书已由中国地质大学(武汉)矿床教研室章锦统等译成中文正式出版了。这是我国矿床地质学科文献建设中的一件好事。应该指出,在矿床学科方面,国内外公开出版的比较有份量的专著并不多见,而涉及风化矿床及其成矿作用的大型著作更鲜为人知。从这个意义上看,本书的出版是十分有益的。

风化矿床是铁、锰、镍、铀、铝土矿、高岭石、膨润土、重晶石以及铜、锡、铌、钽、稀土、金、磷、菱镁矿、滑石、盐类等多种矿产的重要成因类型。本书的出版不仅对教学科研有参考价值,而且对有关风化矿床的寻找也将起一定推动作用。

作者以风化前原岩中 useful 组分不同富集程度区别为矿床、低品位矿化岩石及正常岩石为背景,深入探讨大陆风化作用的机制和产物,从而使本书具有鲜明特色。

Samama 教授曾于 1986 年应邀到本校讲学。他以本书内容为主要依据的讲座深受听众欢迎,因而相信本书也必然为读者所乐于接受。

中法两国地质科学和教育交流正日益加强,本书的出版将为促进中法两国地学工作者的友好合作作出新的贡献。

中国地质大学(武汉)

赵鹏大

1989 年 3 月 14 日

译者的话

法国国立南锡地质勘探学院 (L'Ecole Nationale Supérieure de Géologie Appliquée et de Prospection Minière de Nancy) 前任院长、著名矿床学家 J. C. Samama 教授曾于 1986 年 3 月 11 日至 3 月 18 日以“矿田与大陆风化”为题,向中国地质大学(武汉)师生系统地介绍了他本人及国外同行近几年来对外生矿床研究的主要成果与今后发展的趋势。讲座内容充实、丰富,图文并茂,深受欢迎。

我们认为很有必要,也有义务向国内同行们介绍目前国外外生矿床方面的研究成果和动态。译文依据美国纽约 Van Nostrand Reinhold 1987 年出版的英文第一版《Ore Fields and Continental Weathering》一书,由中国地质大学(武汉)矿床教研室组织部分教师分工译出。具体分工为:章锦统译第一章和第七章;章传玲、张德会译第二章;高怀忠、周宗桂译第三章;程小林、伍刚译第四章;胡明安、潘仲华译第五章;徐启东、李鹏飞译第六章。夏卫华教授审校了第一章;蒋明霞副教授审校了第二至第七章,并对全文作了文句上的润色。在责任编辑赵福堂老师为提高译文质量做了大量的工作后,蒋明霞副教授又对全稿进行了统校。

由于参加翻译工作的同志较多,英语水平不一致,汉语表达习惯也不尽相同,尤其是受业务水平的限制,译文中肯定会有错误或不妥之处,敬请不吝指正。

译者

1988 年 3 月 18 日

目 录

第一章 经济地质学与大陆风化作用	(1)
一、目的与范围	(1)
二、大陆风化作用——一种经济因素	(3)
三、方法与结构	(5)
第二章 大陆风化作用的地球化学定义及其特征	(8)
一、现代环境	(8)
二、演化因素	(13)
三、大气圈的演化	(18)
四、古风化作用的研究方法	(24)
第三章 大陆风化与矿田的一般关系	(35)
一、地球化学背景和矿田	(35)
二、与迁移的可溶解相有关的矿田	(47)
三、与残余相有关的沉积矿田	(57)
第四章 矿床(或矿化点)的大陆风化作用	(70)
一、铜和镍矿床的次生富集	(70)
二、铁和锰的富集	(96)
三、铀矿床的次生富集	(111)
四、结论	(120)
第五章 低品位含矿岩石的大陆风化作用	(129)
一、红土型镍矿床	(129)
二、与岩溶有关的矿田	(150)
三、结论	(177)
第六章 正常源岩和亚正常源岩的大陆风化作用	(184)
一、铝铁土岩中的铀	(184)
二、与古地面有关的脉状矿床	(192)
三、铝土矿矿床	(201)
四、Morvan 萤石硅结砾岩	(224)
五、正常源岩的风化作用过程评述	(227)
第七章 结论	(234)
一、矿田、大陆风化及其控制因素	(234)
二、大陆风化的发展和矿田的演化	(239)

第一章 经济地质学与大陆风化作用

一、目的与范围

经济地质学的基本原则是了解物理、化学和生物作用对矿床演化的影响，即查明矿床的成因、形成、转化和破坏。如果我们只局限于研究作用于大陆区的表生作用——大陆风化作用，即使该区温-压变化范围比内生作用狭窄得多，它们的研究领域仍然极为广泛和复杂。这一广泛性和复杂性取决于以下三个发生在地表或接近地表的基本因素：生物和微生物的活动，由胶体和细分散物质引起的吸附作用的增强，以及在低温-低压平衡环境中亚稳态平衡相当普遍的发育。

生物活动是控制地表反应最显著的直接或间接因素之一。例如，细菌可以控制硫化物的氧化以及硫酸盐的还原动力学。如果没有硫酸盐还原细菌，这种作用将极其缓慢，在低温条件下产生不了任何重大影响。这种直接的活动，即生物通过新陈代谢所参与的活动可被看作催化作用，因为它能够极大地提高大多数反应速率。我们已知有许多种反应，但是迄今对大多数生物过程还不甚了解或一无所知。例如，对于陆生植物对金或硅的溶解的动力学所起的作用，我们刚刚才开始予以关注，但缺乏定量的了解。生物也可属于一种间接因素，因为有机物的腐烂可提供高效的络合分子，这些络合分子可以提高金和铝的溶解度。

在近地表环境中，也经常发现胶体和细分散的无机产物。这些产物与许多基本的搬运和固着过程有关（Yariv 和 Cross, 1979）。例如，对河水中金属含量的研究表明，在大陆条件下最普遍和有意义的是粒子物质搬运，这些粒子可呈矿物细粒或元素形式吸附于胶体及具有较大表面积的物质上。吸附作用也可看作是限制痕量元素分散的一种重要因素，由此在某些实例中形成显著的异常。在某些过程（如双氧铀化合物还原）中，吸附过程是还原过程中产生不溶解沉淀之前的一个必要的过渡阶段。

亚稳态平衡在地表条件下是常见的，例如，在富铝-硅酸盐表生建造中抽取的大多数渗流水中，可溶硅与石英呈不平衡状态。将这样的水和富钙硫酸盐卤水混合，有利于产生胶体絮状物以及普遍的局部硅化作用（Arnold 和 Guillou, 1983）。

虽然地表的物理与化学条件可能比高温高压条件要复杂得多，本书作者还是想把迄今认识到的大陆风化作用作为矿床形成、富集、转化以及淋滤的一种因素加以综述和归纳。

何谓大陆风化作用？我们可以把大陆风化作用看作是随时空而变化的地表条件与各种岩石之间的地球化学的、矿物的和岩石的再平衡，这些岩石或与较深条件（侵入岩或变质岩以及已通过成岩作用的沉积物）相平衡，或与尚未同局部条件处于平衡的岩屑相平衡。大陆风化同作为地表条件下矿床的一种再平衡作用的表生变化又有什么区别呢？奇特的是，当涉及到含铁建造时，氧化硅强烈的表层淋滤作用被称作表生作用，当与铝土矿有关时，则称之为大陆风化作用。从地球化学观点来看，这两种作用是相似的，它们都是二氧化硅的强烈淋滤

和铁或铝的残留富集的结果。它们的主要区别仅限于习惯的应用上，表生变化通常用于矿床范围，而大陆风化作用则用于地貌、土壤学和岩石力学领域。即使作用是一种，表生作用仍然用得比大陆风化作用要广。例如，铀滚筒式前锋（uranium roll front）为氧化渗流水活动的结果。但是，这方面的问题已超出了本书的研究范围。

对矿床的大量综合性研究表明，除了铝土矿和镍红土矿床外，大陆风化作用表现为对已有富集体的一种附加作用。在一本关于斑岩铜矿综合性研究的著作中(Titley, 1982)，有一章专门用来论述了次生富集，研究铁建造的著作也有类似的情况(参阅 Trandall 和 Morris, 1983)以整章的篇幅(Morris, 1983)讨论表生变化。在研究象 Pine Creek 地槽这样的脉状铀矿床时，其情况还更复杂(参阅 Ferguson 和 Goleby, 1980)。在这本对一个主要矿床的综合性研究的著作中，有些章节探讨了铀次生富集问题，另一些则讨论了与古地表有关的脉状矿床。在许多文章中，大陆风化被认为是一种附属作用。就岩溶矿床来说，综合性研究常常是混乱的，大陆风化(此处为岩溶化)的确切作用很少得到清楚的解释。镍红土矿床经常根据大陆风化作用来研究，可是风化作用被认为仅是一种附属作用。例如 Laznicka (1981) 认为，岩浆作用促使镍发生相对地壳含量的较高富集(25)，而这种富集作用比大陆风化作用更强(8)。因此，在某个大地构造单元内，镍红土矿床分类是与所有大地构造类型(包括活动带及其超基性岩)联系在一起的，但是，这些矿床与气候带的关系便不清楚了。铝土矿床是大陆风化一般不取决于任何原先富集作用的唯一例子。在大多数这类实例中，大陆风化及与其有关的成矿富集作用被认为是附属的作用，这种观点可以称之为“垂向”(即从母岩或矿体往上至地表)的观点，它不同于“水平”观点或地表作用观点(图 1-1)。

在某些例子中，可以完全证明通常的垂向变化，但它使各类矿床的大陆风化作用难于对比，并且也不易指出它们的基本特征。本书中，我们所持的是水平观点——即地表作用观点——并探索一种已知在地

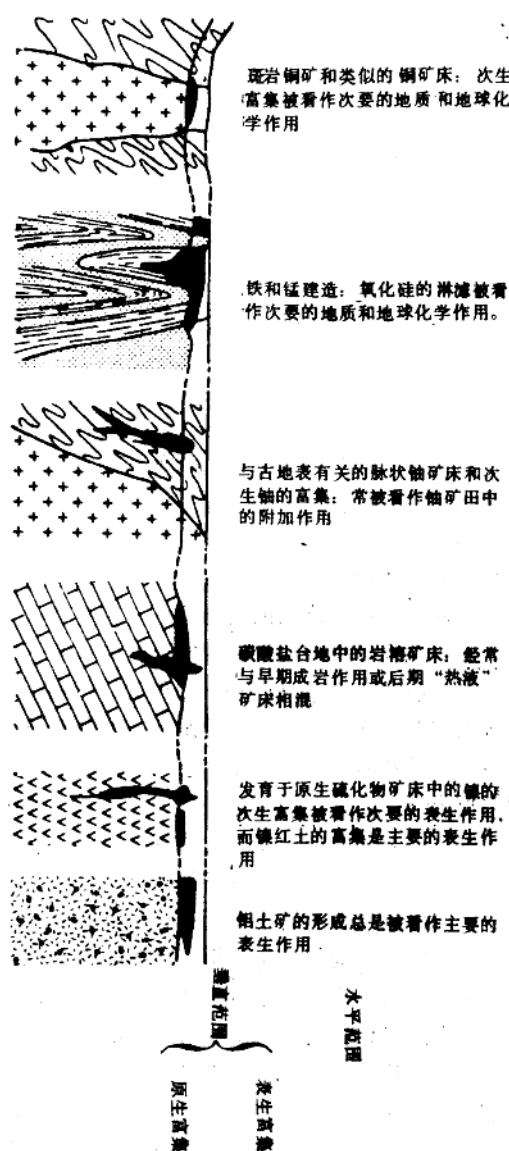


图 1-1 大陆风化与原生矿石及岩石相互关系中的“垂向”观点和“水平”观点示意图

球表面最广泛存在的作用——即大陆风化作用——的内在联系的模型。这种水平观点将更能揭示发育于极端不同的母岩条件下的各种富集作用之间的较为难辨的相似性。

二、大陆风化作用——一种经济因素

正如 Button 和 Tyler (1981) 对南非前古生代建造中大陆古地表所作的详细研究中所强调的,许多矿床受现代大陆风化作用(影响矿体的最上面部分)或古代大陆风化作用的影响。大陆风化所起的作用是十分重要的。例如,世界锡资源的 2/3 以上与风化作用有关(但是锡矿床的研究中约 98% 是针对原生作用的)。

本书对大陆风化作用及其影响的现有认识进行了评述。我们将试图去了解涉及到的机理、质和量的影响以及受大陆风化影响的地区的主要特征(气候、构造稳定性等)。因此,这是一本对矿床感兴趣的科学家和从事矿山勘探的经济地质学家都很重要的书。

地球的现代风化壳覆盖面积约为 $135 \times 10^6 \text{ km}^2$,除了部分地区缺乏任何大气活动外,大部分地区都或多或少受到大陆风化作用的影响。当然,大陆风化作用随着区域或局部条件的改变而变化,大陆风化的经济影响在温带和热带地区有明显的差别。这些作用明显地对矿山开发产生相当大的影响。大陆风化作用涉及三个主要经济领域:矿床、矿石特征(至少在接近地表部分)和用于矿产勘探的工艺技术。本书不仅涉及现代风化条件,还要涉及古风化条件——即第三纪大陆表面和地质史上已知较老的风化条件。

在此,我们准备讨论矿床(在以后几章中对它们有详细的论述),而只是提出大陆风化在矿山开发中有利的(或积极的)和不利的(或消极的)方面加以评述。

(一) 消极的经济因素

有若干实例说明了采矿工业的各种不同领域中,大陆风化消极的经济因素。最显著的一种矿床实例无疑是铀矿床,大陆风化对其有明显的影响,甚至能破坏任何一个已有的矿床。铀是一种对 Eh 高度敏感的元素,因为如果 Eh 增加 0.2V,它的溶解度可增加到 10^5 。因此,假如排水充分的话,由于近地表环境下通常主要是强烈氧化的条件,铀可以被溶解和淋滤掉。在某些情况下,人们认为富铀矿体中的铀在近代风化期内可以被完全淋滤掉。

然而,更经常的是,消极经济影响是在地表条件下矿物转变所造成的。例如,那些产于非洲边缘盆地中的晚白垩世—早第三纪盆地中的沉积磷酸钙矿床,可能遭到了强烈的红土化,这一情况正发生在安哥拉、象牙海岸、尼日利亚、多哥及塞内加尔的磷酸矿床中(Flicoteaux, 1982)。在塞内加尔,Thiès 原生钙磷酸盐矿床遭受了极强烈的风化作用,原生磷酸盐矿转变成铝磷酸盐(纤维钙铝石、针镍矿、银星石)。该矿床由于不规则的风化而发生了内部变化,其磷酸盐矿物的化学稳定性增加了工业加工的费用,从而降低了这种风化矿石的工业价值。遭受强烈氧化作用的锌矿石是更加普遍的例子。目前品位为 8% 的原生带锌矿石(如闪锌矿)被认为是具有经济价值的,而经受氧化且变为异极矿和菱锌矿的,相同品位的矿石,通常就无经济意义,这是因为进行工业加工时锌的回收率低(一般损失 2—3%)及精矿品位低的缘故。风化的铜矿石,甚至被新鲜有机物质污染的金矿石,通常也遇到类似的问题(硅孔雀石几乎不可能回收)。被污染的金矿石在氰化作业前需要除掉有机物质,这使生产成本大大提高。

不过,矿山生产时遇到的主要问题是与勘探有关的。在强烈风化地区——如热带的大部分地区——进行地质工作时,经常碰到的问题是露头很少,因此,地质制图不仅困难,而且

常常不精确；但是，在区域范围内，露头、土壤剖面（常反映隐伏母岩的特征）及航空地球物理图可对正确的地质格局（至少在岩性方面）提供足够的信息。在矿山勘探通常需要的详细比例尺图（1/5000 或更大）上，地质制图常常是极不精确的，甚至在采集了某些样品（在露头或探槽中）时，也因它们的风化程度很高，岩石学研究通常只能局限于对残余结构和未风化物物的粗略鉴定。在强烈风化地区，这种鉴定需要有在强烈风化地区进行地质工作的丰富经验。

对地球物理技术来说，由大陆风化造成的屏障通常也是一个严重的问题。在大部分强烈风化的地区（同样以热带地区为例），厚的土壤层和风化带呈现出低的粉砂与粘土比值，以及一种稳定的潜水，电导率通常是高至很高的。结果，在这样的地区用电法（主要为自然电位）和电磁法探测大多数浸染状矿体和低传导的矿体比在弱风化地区的效果差得多。同样的一些探测技术在弱风化地区能给出正确的结果，在强烈风化地区使用就可能无效，这并不意味着在强烈风化地区不能使用地球物理方法，只是要求使用的仪器比在未风化地区更精密完善。

矿床勘探时碰到的另一个问题是风化带中铀矿石变化不稳定。用放射性技术评价矿石品位一般是不精确的；评价这类矿床时，需要系统地取样并进行化学分析或进行费用很高的直接的现场测定（如中子活化分析等各种技术测试）。

强烈风化区与未风化区的地球化学勘查程序是显著不同的。例如，在红土地带勘察镍硫化物矿床要比在寒冷地区困难得多；在西澳大利亚，探寻这样的矿床需要使用特殊的分析方法（使用连二亚硫酸钠进行镍的萃取），以便较好地吧硫化物型和硅酸盐型的镍矿区分开，后者由一般的超铁镁质岩石经强烈风化后形成（Smith, 1977）。这个例子说明，任何一个强烈红土化作用（其深度常常超过 100m）都会给地球化学勘查构成较大的障碍，需要用特殊的地球化学技术进行取样、分析及判释。近 20 年来，这个问题已受到很大的重视，找到了部分解决的办法，例如使用多元判别技术（Butt, 1981；Zeegers、Goni 和 Wilhelm, 1981）。勘查地球化学需进一步弄清在风化时元素扩散的过程，目的是为了提供新的、更有效的技术。

在矿山开发时遇到的某些问题是由于大陆风化作用造成的，因而适应弱风化地区的技术不能直接应用于强烈风化的地区，即使一般的仪器在某些地方可使用（例如在巴西的亚马逊地区，地球化学勘探发现了 Salobo 铜矿床），但矿山开发仍需要更先进精密的仪器。

（二）积极的经济因素

一些例子说明，在矿业的不同方面，大陆风化是一种积极的经济因素。首先，我们必须指出大陆风化在一些矿床类型中所起的作用。

关于大陆风化的各种作用，在第三、四、五、六章中作了详细的论述，并在第四、五和六章中引述了相应的例子。但是，在此必须强调大陆风化的三种主要的作用。大陆风化的机械作用可以用前古生代铁矿床和残积矿床两者的崩解为例来加以说明。在一些铁矿石（变软的）中见到的风化初期阶段由氧化硅的溶解（第五章）引起的矿石的机械性质的变化，可能使采矿和破粹的成本降低 55% 之多。风化的这种机械作用在残积-冲积矿床中似乎也是一种主要因素。锡石矿床的实例可以说明这种因素：尼日利亚富锡的较年青的花岗岩及类似的含锡岩石，只有当它们遭受过强烈的热带风化作用才具有经济价值（Varlamoff, 1975）（第三章）。

除了上述机械因素外，化学因素对富集也起着显著的作用。相对富集（由于非矿石物质

的溶解和迁移)可用某些铁矿石氧化硅的迁移的实例(第四章)或铝土矿的典型实例[其中的硅、钙、钠和钾的迁移(第六章)]来说明。绝对富集(具经济价值的矿物或化合物的有限的迁移和次生富集)可用铜或铀矿石的次生富集加以说明(第四章)。在某些矿床中(例如红土型镍矿床中)可以同时包括相对的和绝对的富集作用(第五章)。

除了富集作用外,矿石特征也可以有明显的改善。许多例子可说明这种看法。当铜次生富集时,辉铜矿的形成是一种有利的因素,因为这种富铜的矿物通常有利于形成富铜矿体(第四章)。风化壳中金的溶解和次生沉淀也是一种常见的有利因素,因为它可导致粗颗粒金的形成,从而有可能降低回收的成本(第三章)。在风化作用中,可见到杂质被选择性的淋滤的情况。例如,据Ward(1981)的资料,在西澳大利亚,红土风化可为钒-钛-铁电解炉提供没有硫和磷(生产钢时的有害杂质)及钙和镁(生产钛渣和人工金红石时的有害杂质)的精矿。

矿山勘探时涉及到大陆风化的主要是地球化学勘探方面的问题,它可被认为是矿体与表生地球化学模型之间的“无形链环(missing link)”,亦即靶区与运用地球化学技术所获资料之间的“无形链环”。彻底查明元素在地表分散的控制因素,是有效地解释地球化学数据的必要前提。风化作用是地球化学勘查的屏障,但也是造成用于大多数地球化学技术中的分散模式的因素;如果不具分散模式——即没有经过机械和化学风化——一种非常薄而富的矿脉,例如厚度仅5—10cm的纯方铅矿或黄铜矿脉,实际上用通常的地球化学方法是不易发现的。

对消极的和积极的因素加以权衡,就可清楚地看出,虽然由于风化作用的影响,勘探中往往需要更为复杂的技术设备和更高的勘探成本,但它仍是矿山开发中的有利因素。

三、方法与结构

本书的主要宗旨是介绍矿床与风化作用的相互关系,为达此目的,可以通过几种途径。最常见的分类是以元素的典型化学行为为依据,通常分为两组主要类别的元素:形成残留矿床(例如残积矿床、铝土矿床、红土型镍矿床^[1]、含铁建造富集带等)的残留元素组和形成次生富集矿床(例如一些铜和镍的硫化物矿床)的元素组。也可以依据风化作用的主要类型,即依据气候环境,进行分类。

但是,下面介绍的是一种不同的途径,在概括介绍风化作用与成矿作用的相互关系之后,依据未风化的环境的富集程度,划分出三种主要矿田类型。按这个办法,我们划分出作用于经济或次经济矿田的风化作用(第四章),作用于低品位矿化岩石的风化作用(第五章)及作用于地球化学丰度正常的岩石的风化作用(第六章)。

这种分类是依据风化前的富集作用和风化富集作用二者所起作用的相对大小这个原则来进行的(图1-2)。在第一类中,大陆风化可认为是作用于矿体的一种附加的因素。第二类中,矿田因风化前作用和风化作用两者的共同作用而取得了经济价值。例如红土型镍矿床就是这样;在这种矿床中,母岩(超铁镁岩)中虽然富含镍,但还不能称为矿,因为还需加上风化作用,这类岩石才能成矿。在第三类中,风化作用被认为是富集的主要因素,铝土矿矿床即为一例。这种分类方案并不新鲜,只是企图考虑各种作用的相对富集和它们所起的经济作用。当然,这三种主要类型之间的界限是不固定的,因为这个分类原则认为风化前和风化过程是逐渐变化的。但是,如同本书相应章节中所阐述的,在矿山勘探工作中,风化前的地质对第一类矿田比对第三类矿田更有意义;在第三类矿田中,自然地理因素似乎占绝对优势。

因此，本书的结构是十分简单的。第二章研究大陆风化作用，阐述那些现代和古代的作用，它们对研究组成矿床的主要和微量元素的表生行为是重要的。第三章介绍大陆风化和矿田的一般关系，论述元素的活动性、与可溶性元素迁移有关的矿床及与残余相有关的沉积矿床。第四、五、六章阐述三种主要类型，各章均围绕几个典型实例编写而成。所选择的每一个实例皆强调经济意义、地球化学作用、特殊的自然地理条件及风化的时间，必要时也对某些事例和基本概念进行讨论。第七章综合了一些主要的概念，特别是“地球化学障”及稳定性（抬升率）的概念。

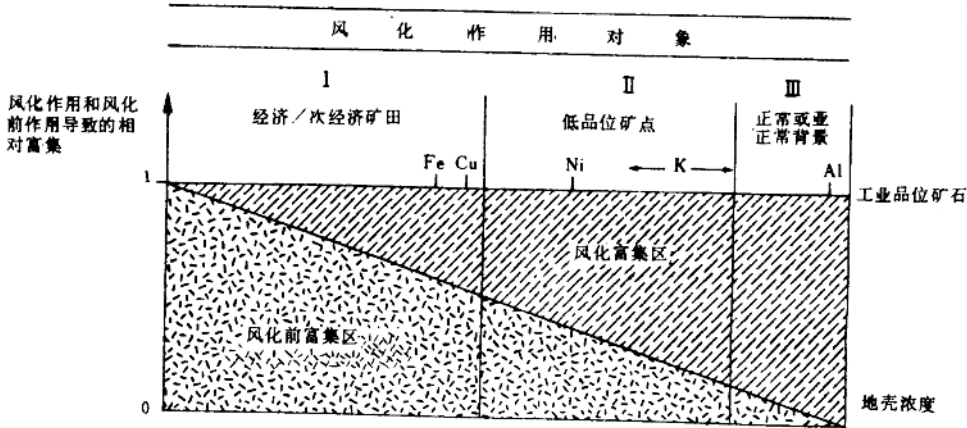


图 1-2 风化前作用和风化作用在工业富集中相对作用的理想模式

相对富集表示的是风化前作用和风化作用对含铁建造（Fe）的富集、铜（Cu）的次生富集、含镍红土（Ni）、岩溶锌（K），以及花岗岩或玄武岩区铝土矿（Al）的相对影响。例如，次生富集铜矿工业品位为 0.8% Cu，其中包括风化前作用提供约 0.45% 的 Cu 和风化作用提供 0.35% 的 Cu。对于一种含镍 1.5% 的红土型镍矿石来说，其中约 0.2% 的 Ni 是由风化前作用形成的，约 1.3% 是由风化作用形成的。对于含铁建造（Fe）来说，其工业品位（68%）^①是由原生作用（形成 38% Fe）和次生（表生）作用（形成 25% Fe）形成的。关于含铁建造、红土型镍矿和铝土矿的资料是众所周知的，关于次生铜的一般平均数据已有描述；关于岩溶矿床的数据是推测的。

此模式展示的是风化富集的一个典型实例，所绘制的位置常会发生显著变化，这是因为表生富集作用的影响可能很小，或者因为可能存在一些局部的特殊的富集作用

本书围绕典型实例编排，不是作为一种大陆风化形成的矿床的完整的分类。对所精选的重要实例皆进行了描述、讨论，并依据风化作用进行解释。描述是十分简明扼要的，仅介绍了必要的内容。书中使用的资料取自作者已出版的，未出版的及实验研究，也引用了他人近年公开发表的研究成果。

书中涉及的领域比较广：经济地质、热力学、地球化学、应用地球化学、土壤学，同时也不同程度地涉及到所谓的“蚀变学（alterology）”。相应的术语极不相同，在叙述时产生了许多困难。例如，在本章讨论中，“表生作用（supergene）”和“风化作用（weathering）”概念的区别就是这类问题的一个典型。特别是在风化层和风化岩性学中应用的术语，此类问题可能更为复杂。为此，本书尽量采用最通用的术语。

① 原文如此，疑为 63% 之误。——译者

注 释

1. 根据镍在红土风化中的化学行为, 红土型镍矿床很容易被列为“次生富集矿床”。

参 考 文 献

- Arnold, M., and J. J. Guillou. 1983. Croissance naturelle de paracristaux de quartz dans une saumure sulfatée calcique à basse température. *Bull. Mineralog.* 106, 417—442.
- Butt, C. R. M. 1981. Some aspects of geochemical exploration in lateritic terrains in Australia. In *Lateritisation Processes*, pp. 369—380. Rotterdam; Balkema.
- Button, A., and N. Tyler. 1981. The character and economic significance of Precambrian paleoweathering and erosion surfaces in Southern Africa. *Econ. Geology 75th Anniv. Vol.*, pp. 686—709.
- Ferguson, J., and A. B. Goleby, eds. 1980. *Uranium in the Pine Creek Geosyncline*. Vienna; International Atomic Energy Agency, 760p.
- Flicoteaux, R. 1982. Genèse des phosphates alumineux du Sénégal occidental, étapes et guides de l'altération. *Sciences Geol. Mém. No. 67*, 229p.
- Laznicka, P. 1981. Platform versus mobile belt-type 'stratabound/stratiform ore deposits; Summary, comparisons, models. In *Handbook of Stratabound and Stratiform Ore Deposits*, vol. 8, ed. K. H. Wolf, pp. 513—592. Amsterdam; Elsevier.
- Morris, R. C. 1983. Supergene alteration of banded iron formation. In *Iron Formation: Facts and Problems*, Developments in Precambrian Geology, vol. 6, ed. A. F. Trendall and R. C. Morris, pp. 513—534. Amsterdam; Elsevier.
- Smith, B. H. 1977. Some aspects of the use of geochemistry in the search for nickel sulphides in lateritic terrain in Western Australia. *Jour. Geochem. Exploration* 8, 259—281.
- Titley, S. R., ed. 1982. *Advances in Geology of the Porphyry Copper Deposits*. Tucson; University of Arizona Press, 560p.
- Trendall, A. F., and R. C. Morris, eds., 1983. *Iron Formation: Facts and problems*, Developments in Precambrian Geology, vol. 6, 558p. Amsterdam; Elsevier.
- Varlamoff, N. 1975. Classification des gisements d'étain. *Acad. Royale Sci. Outre-Mer Cl. Sci. Nat. et Med.* 19, 2—63.
- Ward, H. J. 1981. The effects of lateritisation at Barrambie, Western Australia. In *Lateritisation Processes*, pp. 24—33. Rotterdam; Balkema.
- Yariv, Y., and H. Cross. 1979. *Geochemistry of Colloid Systems*. Berlin; Springer-Verlag, 450p.
- Zeegers, H., J. Goni, and E. Wilhelm, 1981. Geochemistry of lateritic profiles over a disseminated Cu-Mo mineralisation in Upper Volta (West Africa), Preliminary results. In *Lateritisation Processes*, pp. 359—368. Rotterdam; Balkema.

第二章 大陆风化作用的地球化学定义 及其特征

一、现代环境

在探讨矿田和风化作用在时间、空间和活动带演化阶段等方面的地质及地球化学联系之前，我们有必要了解大陆风化作用的现代环境，并对其进行分类。大陆风化作用的一般概念是指地表环境对岩石或新鲜沉积物的作用，通常划分为两种作用。当没有或几乎没有液态水时（非常干旱或极地环境），只有机械作用，可称为崩解作用或碎裂作用；虽然母岩的整体构造受到破坏，但仍保留了其中的矿物成分和化学成分。与此相反，当有充足的液态水时，岩石-水的相互作用可以造成矿物和化学成分上的多种变化，包括各种矿物的蚀变、转变及次生矿物的形成等，还包括常量和微量元素的增加或减少。

根据当地的气候、地貌、构造、植物或土壤环境，我们就能对大陆表面及其风化作用现象进行描述。由于这些资料不但精确性差，而且与地质事件无直接联系，所以应用在矿田地质研究中可能造成自相矛盾和困难。为了很好地认识大陆风化作用与矿田或矿床之间的关系，以便逐个地点、逐个时期和逐个母岩地比较它们的风化作用环境，我们必须对风化作用环境作精确的表述。我们还有必要确定风化环境与地表风化层中常量与微量元素地球化学行为之间的相互关系。这就意味着应用到整个时空中的数据精度最好是定量的，或至少是半定量的。对贯穿整个时空的气候环境的正确认识将为研究大陆风化作用和矿田之间的联系奠定良好的基础。然而，我们通常缺乏论及古气候的资料，主要依据的是古温度资料，缺乏降雨量和季节分布资料。资料的不足可归因于古气候的研究方法——主要是生态学的、沉积学的以及氧同位素的方法，使用这些方法比较更适合于对古温度的恢复，而不易进行真正古气候的再造。

研究风化剖面本身及其上部的土壤（土壤学）、或者研究全球范围的风化剖面——包括土壤及较深的地层——是评价风化作用环境或古风化作用环境的最好方法。第一种方法曾由 Lelong 等人（1976）根据各种土壤和母岩中元素的活动性差异进行了描述，它对比了风化作用与现代矿床富集的关系。据 Pedro（1968）报导，第二种方法是根据铝、氧化硅及碱性阳离子淋滤的相对动力学原理以风化作用的地球化学分类形式而提出的。上面介绍的两种现代风化作用环境的表述基本上是相同的。下一章我们将以第二种表述作为基础，并引用 Lelong 等人（1976）有关微量元素活动性的资料。

（一）四种主要风化作用类型的地球化学定义

现代大陆约占地球表面的 28—29%，而大陆表面 2—3% 被冰覆盖。然而，由于大陆的不

断演化和海平面绝对标高的变化，大陆的相对表面不是永恒不变的。从极地进入赤道地区的任何人，都会观察到土壤和风化剖面类型的大幅度变化。大量详细地科学研究得出的结论认为气候、母岩、区域及局部地貌、排水系统及风化作用持续的时间等各种决定因素，以及它们的相互作用，相应产生了各种不同结果。土壤学诞生后就着手对土壤进行分类，这些分类和相应的土壤图是描述性的。由于在地质记录中缺乏土壤本身的残留物，因此这些分类及相应的土壤图不能适应地质的目的要求。考虑到全球风化剖面及对它们的地球化学解释(Pedro, 1966, 1968)，现代分类看来更为合适。Pedro (1968) 根据氧化硅和铝淋滤的相对比率对主要的风化作用进行了划分。可划分出四种主要类型的风化作用 (表 2-1)。

表 2-1 四种主要风化作用类型的定义及特征

特 类 型 征	铝土岩化作用 (红土化作用)	单硅铝土化作用 (高岭土化作用)	双硅铝土化作用	灰化作用
地表地球化学 演化特征	$q(\text{Al}_2\text{O}_3) < q(\text{SiO}_2)$ (溶变作用、水解作用)			
	$q(\text{SiO}_2) \geq q(\text{碱金属})$	$0.64q(\text{碱金属}) \leq q(\text{SiO}_2) < q(\text{碱金属})$	$q(\text{SiO}_2) < 0.64q(\text{碱金属})$	$q(\text{Al}_2\text{O}_3) > q(\text{SiO}_2)$ 整合淋溶作用
淋滤带的矿物 学特征	氢氧化铝、三水铝石 —水软铝石	层状硅酸盐 1/1 高岭石	层状硅酸盐 2/1 硅石、蒙脱石	游离氧化硅(石英)
气候特征	$T > 20^\circ\text{C}$ 降雨量 1500mm	$T > 15^\circ\text{C}$ 降雨量介于 500—1500mm 之间	$T < 15^\circ\text{C}$ 降雨量 < 500mm	全年气温(T) $> 10^\circ\text{C}$ 不超过四个月
铁的活动情况	铁化作用(红土化作用)			无铁化作用
土壤类型	氧化土	淋溶土、老成土	软土、始成土、 旱成土、淋溶土	灰土

资料来源: 据 Pedro, 1968, p459

第一种类型称为“整合淋溶作用 (cheluviation)” (Swiadale 和 Jackson, 1956)。这一术语是依据生物活动产生的有机络合物的效应而提出的。在酸性和络合环境中, 通过螯合作用, 铝易于溶解并被带出土壤。二氧化硅具有类似的地球化学性质, 但是它淋滤的比率低, 结果是使淋滤带中逐渐富集了氧化硅。相应的土壤就是通常所说的灰土 (spodosol) [法国的分类中称灰化土 (podzolic soil)]。这种作用的地球化学表达式为 $q(\text{Al}_2\text{O}_3) > q(\text{SiO}_2)$, 其中 q 代表天然 (或实测) 淋滤的比率或元素萃取的比率。

在其它三种类型中, 风化作用发育的地方不含铝的螯合作用和溶解作用形成的有机络合物, 主要的作用称作“溶变作用 (soluviation)” (Swindale 和 Jackson, 1956)。在这三种类型中, 主要的地球化学作用为水解作用, 其地球化学表达式为 $q(\text{Al}_2\text{O}_3) < q(\text{SiO}_2)$ 。根据氧化硅和碱性阳离子淋滤 (或萃取) 的相对比率, 这一普遍情况可划分为三类。

如果氧化硅淋滤的比率很低, 且低于 $0.64q(\text{碱金属})$, 则充足的氧化硅、铝和碱性阳离子就可能形成双层粘土矿物 (如蛭石、蒙脱石等) 的次生建造, 为此这种作用被称为“双硅铝土化作用 (bisillitization)” (Pedro, 1966)。在温暖地区, 相应的土壤是始成土 (inceptisol) 或淋溶土 (alfisol), 而在寒冷或炎热的干燥地区, 相应的土壤是软土 (mollisol) 或旱成土 (aridisol)。

如果氧化硅淋滤的比率较高, 则由于氧化硅富集程度太低不能形成双层粘土矿物。在相同的风化条件下, 碱性阳离子淋滤的相应比率也高。地球化学条件可表示为 $0.64q(\text{碱金属})$

$\leq q(\text{SiO}_2) < q(\text{碱金属})$ ，这种条件有可能导致单层粘土矿物即高岭石的形成。因此，这种作用称为“单硅铝土化作用 (monosillitization)” (Pedro, 1966)，相应的土壤是淋溶土 (alfisol) 或老成土 (ultisol)。

最后一种主要作用与氧化硅和碱性阳离子的高比率淋滤有关，它可以表达为： $q(\text{碱金属}) \leq q(\text{SiO}_2)$ 。由于没有足够多的硅和碱性阳离子形成任何次生粘土矿物，所以只能形成铝的氢氧化物如三水铝石。Harrassowitz (1962) 将这一作用称为“铝土岩化作用 (allitization)”，相应的土壤是氧化土 (oxisol)。这种情况可用铝土矿田的发育很好地加以说明 (第六章)。

简单介绍大陆风化作用的地球化学特征对矿田的研究似乎是有利的。然而，双硅铝土化包括了不同气候环境下的土壤，如温带、寒冷的干旱气候和炎热的半干旱气候环境下发育的土壤，看来是太笼统了，但利用二氧化硅和碱金属的行为可以更完善地反映四种主要风化作用的特性。此外，铁的活动情况在风化过程中也会发生急剧地变化，我们应该对此有所认识。在寒冷的环境中，铁既可以被淋滤出，也可以作为腐植质化合物被捕集或结合到次生的粘土矿物中去，即使在富铁的粘土不常见的情况下也是如此 (Pedro, 1968)。在炎热条件下，铁形成独立的氧化物或氢氧化物。相应的作用即通常所说的“铁化作用 (ferruginization)”或“红土化作用 (rubefication)”。根据特征的矿物组合和粒度分析，我们可以很容易地鉴别这种呈现红棕色的风化作用。

(二) 风化作用类型的气候控制和地理分布

研究不同风化类型发育的气候条件，可以利用许多局部地区的详细研究成果。Pedro (1968) 曾研究了在起伏不大但却具有良好的垂直排水系统的地形上发育的长英质组分岩石的近代 (近 5000 年) 风化剖面。他指出了不同风化类型的气候特征，并绘制了地球表面不同风化类型的概略分布图 (图 2-1)。倘若不受迅速的近代气候变化、岩性因素或地形的起伏等局部异常情况的干扰，这样的图则可以说明不同风化作用类型的分布特征。

表 2-2 各种大陆风化带在全球的概略分布

风化作用	带	百分率 (%)
无化学 风化作用	沙漠带	4
	严寒带	10
有化学 风化作用	灰化带	15.5
	双硅铝土化带	39*
	单硅铝土化带	8
	铝土岩化带	13.5

资料来源: 据 Pedro, 1968, p459

* 潮湿带和寒冷带 = 24%；干燥和炎热带 = 15%

温度很低的地区或通常的干旱区 (无雨或几乎无雨) 不存在风化作用。被冰帽直接覆盖的冰川带是 Pedro 确定的第一种情况。冰川覆盖物约占大陆表面积 10%；事实上，冰川的延展范围比较宽广，包括整个极地。据记载，极地的气温每年至少有 300 天处于 0℃ 以下。第二种情况是干旱带，限于绝对荒漠的地区 (absolute desert)，具有至少一年内无雨的特征 (死谷或 Tanezrouft)；该带约占大陆表面的 4% (Pedro, 1968) (见表 2-2 和图 2-1)。发育在冰川带和干旱带的唯一的风化作用是机械风化作用 (崩解或碎裂作用)。

灰化作用主要发育在具有典型寒带植物群的极地附近。从气候上看，这些地区每年平均温度低于 10℃ 的时间超过四个月 (Rübner 和 Reishold, 1953)。这样的地区约占大陆表面的 15.5% (Pedro, 1968)。

铝土岩化作用也充分地受控于盛行的气候条件，发育在年平均温度在 15℃ 以上，年降雨量大于 1500mm 的地区。其特点是含有三水铝石，这说明高温和其它条件有助于碱金属和氧化

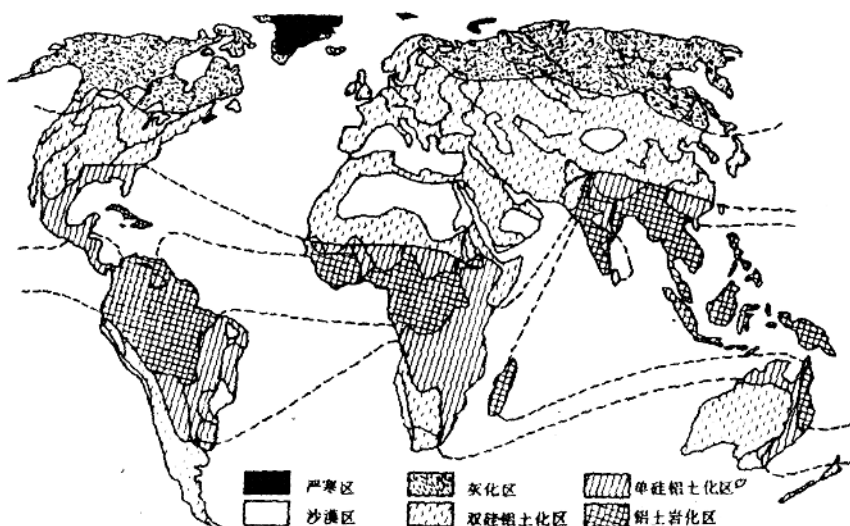


图 2-1 据气候资料编制的主要风化作用类型分布略图
 图中共划分六个风化区（其中两个无风化作用，四个具风化作用）
 （据 Pedro, 1968, p463）

硅非常迅速地淋滤。这样的地区约占大陆表面的 13.5%，主要分布于赤道地区。

根据矿物学理论，单硅铝土化作用形成次生高岭石，不形成三水铝石。通常的气候条件为：年平均气温大于 15℃、年降雨量为 500—1500mm。这样的地区约占大陆表面的 18%，主要出现于热带环境中。

最后一个主要的风化作用是双硅铝土化作用。其作用的范围也可以准确地划定。其较寒冷地区的边界线以灰化作用为标志，而较温暖地区的边界线则以单硅铝土化为界来划定（降雨量 500mm，气温 15℃）。这类地区面积广阔，占整个大陆表面的 39%。然而，其中半沙漠区（炎热和干燥的环境）具有发育很差的双硅到单硅粘土矿物的次生建造（约占 15%）。而真正的双硅铝土化作用区则以潮湿和寒冷气候为特征（占 24%）。

与对矿物次生建造的直接观察相反，有人利用局部地区的气候资料，编制了上述主要风化作用带分布图。因此它只是一张各种风化类型可能的发育状况的略图。这些类型的真正发育状况可以在那些风化作用具有充足的持续时间、适度的地形起伏、显然能达到渗滤水与矿物组合之间的平衡的排水系统的有关地区观察到。这种潜在风化作用的概念类似于土壤带的概念，即被认为是与当地自然地理环境和植被处于平衡的土壤。

这一概念同样适用于铁的行为。正如前面指出的那样，铁或从风化剖面中被淋滤出来、或结合成铝硅酸盐、或作为稳定的氧化物-氢氧化物存在。“铁化作用（Ferruginization）”或称红土化作用（Rubefication），发育于年平均气温高于 20℃、降雨量在 50mm 以上的地区。因而，红土覆盖了整个铝土岩化和大范围单硅铝土化地区。因此红土往往与次生高岭石相联系。红土化地区的地表面积约占大陆表面的 29%（表 2-1 和图 2-2）（Pedro, 1968）。由此看来，红土