

# 华南氧化锰矿晚新生代大规模成矿

李建威<sup>1,2</sup>, 颜代蓉<sup>1,3</sup>, 邓晓东<sup>2</sup>, 陈 蕾<sup>2</sup>, Paulo Vasconcelos<sup>4</sup>

1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 中国地质大学 资源学院, 武汉 430074;  
3. 湖北省地质调查院, 武汉 430030; 4. 澳大利亚昆士兰大学 地球科学系, 布里斯班 4072

**摘要:** 氧化锰矿是我国仅次于沉积型碳酸锰矿的重要锰矿床类型, 主要分布在广西、湖南、广东和福建等南方省区, 但由于定年手段的限制, 迄今对我国氧化锰矿形成时代的了解还极其有限。作者近几年利用激光阶段加热<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 同位素分析技术对华南地区典型氧化锰矿进行了系统和精确的年龄测定, 获得了一大批可靠的成矿年龄, 年龄值介于 23.64 ± 0.29 Ma 和 0.48 ± 0.17 Ma (2), 表明华南氧化锰矿的大规模成矿至少在渐新世末-中新世初就已开始并一直持续到更新世末期。基于多数氧化锰矿的上部矿石已被剥蚀或开采殆尽这一事实, 可将华南氧化锰矿的成矿时间上溯到渐新世早期甚至始新世末期。研究发现, 氧化锰矿的保存程度和年龄分布明显受新构造运动的影响; 如果剔除后期剥蚀程度和采样系统性的影响, 可以认为华南氧化锰矿的形成在区域上具有同时性。本次研究还说明, 次生氧化锰矿的成矿是一个极其漫长的过程, 形成一个具有工业意义的氧化锰矿可能需要上千万年的时间; 这明显有别于多数内生热液矿床的成矿。本研究为我国氧化锰矿以及其他类型的风化矿床(如红土型金矿和红土型镍矿)的年代学研究提供了新的思路和途径。

**关键词:** 氧化锰矿; <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄; 化学风化; 华南

**中图分类号:** P610.320.5/6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2008)03-0226-06

## <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar Constraints on Pervasive Supergene Manganese Mineralization of the Late Cenozoic Age Throughout South China

LI Jian-wei<sup>1,2</sup>, YAN Dai-rong<sup>1,3</sup>, DENG Xiao-dong<sup>2</sup>, CHEN Lei<sup>2</sup>, VASCONCELOS Paulo<sup>4</sup>

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Wuhan 430074, China; 2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Geological Survey of Hubei Province, Wuhan 430030, China;  
4. Department of Earth Sciences, The University of Queensland, Brisbane 4072, Australia

**Abstract:** Supergene Mn-oxide deposits are widely distributed in Guangxi, Guangdong, Hunan, and Fujian Provinces of southern China and represent the second most important Mn ore types, following the sedimentary Mn-carbonate deposits in China. However, knowledge on the timing of supergene Mn enrichment is very limited due to lack of radiometric dating methods that are applicable to this type of deposit. In the last few years, the authors have performed a comprehensive geochronological study of supergene Mn-oxide deposits by using the <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar method. Incremental heating analysis of around 110 mineral separates of K-bearing Mn-oxides yielded reliable plateau ages that range from 23.64 ± 0.29 Ma and 0.48 ± 0.17 Ma (2). The age data thus indicate that pervasive supergene Mn enrichment in South China commenced at least in the latest Oligocene and persisted into the present time. Given the fact that the uppermost parts of most Mn-oxide deposits have been removed or destroyed by later denudation and/or mining, the supergene mineralization event may date back to early Oligocene or even the Eocene. The age distribution of supergene Mn-oxide deposits in South China shows a spatial trend, with the youngest ages recorded in the west, whereas the oldest ages were preserved in the east. This reflects how tectonic stability has affected the preservation of weathering profiles and Mn-oxides deposits therein. The results from this study also demonstrate

收稿日期: 2008-06-10 收到

基金项目: 国家自然科学基金资助(40573021, 40202010); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET05-0665); 霍英东教育基金会高等学校青年教师基金项目(101017)

第一作者简介: 李建威(1970—), 男, 教授, 博导, 专业方向: 矿床学. E-mail: jwli@cug.edu.cn.

that formation of an industrial supergene Mn-oxide deposit may have spanned tens of million years, in great contrast with most hydrothermal deposits that may be formed in only 10s to 100s thousand years. The approaches and procedures employed in this study can be used in the study of geochronology of other weathering-related ore deposits such as lateritic gold and nickel deposits.

**Key words:** supergene Mn-oxide deposit; chemical weathering;  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating; South China

次生氧化锰矿是我国重要的锰矿床类型,也是我国优质锰矿和富锰矿最重要的来源之一。多数情况下,次生氧化锰矿床是在温暖潮湿的古气候条件和大气、水、生物等多种营力作用下,由含锰源岩(或原生锰矿床)发生氧化、分解、搬运和重新堆积而成。研究其年代学不仅有助于正确理解优质富锰矿床的形成机制、时空分布规律及指导矿产勘查,而且可为区域古气候和古环境的恢复或重建提供重要线索。作者通过对我国华南一些典型氧化锰矿较系统的同位素年代学研究,初步建立起我国氧化锰矿的成矿时代格架<sup>[1,2]</sup>。

## 1 矿床地质特征

我国的次生氧化锰矿主要分布在广西、湖南、云南、广东和福建等省区。本文涉及广西下雷锰矿、广西钦州-防城地区的料连、滩营、大垌和地坑锰矿、广东新榕锰矿以及湖南东湘桥锰矿。这些矿区内古生界地层分布广泛,其中与氧化锰矿关系最为密切的是上泥盆统和下二叠统海相沉积岩地层。含锰地层的主要岩性为灰岩、黑色页岩、硅质岩和钙质粉砂岩,厚度几十米至几百米不等。含锰地层中锰的含量一般小于 12%~15%,以菱锰矿、钙菱锰矿、锰方解石(白云石)和含锰方解石的形式存在<sup>[3]</sup>。在下雷、钦州和东湘桥矿区,还普遍出现 0.  $n \sim n$  m 厚的碳酸锰矿层(可达十几层)。含锰地层是次生氧化锰矿成矿的重要物质基础。广东新榕锰矿的矿源层较为复杂,除泥盆系地层外,元古宇云开群变质岩和矿区北部的热液硫化物脉也为氧化锰矿的形成提供了部分成矿物质<sup>[4]</sup>。

华南地区自三叠纪开始陆续结束海相沉积历史,大部分地区于三叠纪末期隆升成陆。晚三叠世的印支运动使古生界(尤其是上古生界)地层普遍发生强烈褶皱,挤压强烈时在褶皱两翼出现走向逆冲断层。燕山运动在华南地区形成以东北向雁行褶皱、张性断裂和断陷盆地为主的区域构造体系;但桂西南和桂西地区则以北西向的箱状复式褶皱和走向逆冲断层为特色,显示受右江构造体系的影响<sup>[5]</sup>。新生代以来的区域构造隆升使古生界地层得以在大

部分地区出露或接近地表并遭受风化、剥蚀<sup>[6]</sup>,也标志着次生氧化锰矿成矿的开始。

华南地区风化壳十分发育,风化壳厚度一般在 20~30 m 以上,断裂构造发育处甚至超过 150 m。由于后期剥蚀作用,风化壳上部组成(硬质结壳带、淋滤带等)多被剥蚀而未能保存下来,多数风化壳以铁质和粘土质腐岩带为主,后者是次生氧化锰矿最主要的赋存场所。

## 2 氧化锰矿基本矿化特征

根据矿体形态、分布和与含锰地层或胚胎矿的关系,以及矿石矿物的沉淀机制等因素,将华南氧化锰矿分为锰帽型、淋积型和堆积型三种<sup>[7]</sup>。本文研究仅涉及前两种类型。锰帽型矿床形成于沉积碳酸锰矿床或含锰岩系的氧化带中,矿体产状与原生沉积锰矿或含锰岩系协调一致,呈层状产出。矿体沿走向延伸较长,沿倾向变化较大,受原生含锰层位的厚度及潜水面深度的控制。成矿方式以交代为主,矿石具块状、粉末状、条带状和网格状构造。淋积型锰矿床可形成于不同层位、不同组成含锰岩系的风化壳中,矿体多分布于构造破碎带、裂隙、矿物溶蚀空洞中;矿体形态复杂,大小悬殊,多呈扁豆状、透镜状、脉状、囊状、似层状以及不规则状产出,在水平和垂直方向上,矿体经常膨大缩小、分支复合或尖灭再现;矿石具特征的肾状、葡萄状、环带状、脉状、角砾状、皮壳状构造。锰帽型和淋积型矿床的矿石矿物相似,主要为软锰矿、隐钾锰矿、钡锰矿、恩苏塔矿和锂锰矿,并经常与铁的氧化物、氢氧化物和粘土矿物共生。

## 3 样品和分析方法

系统采集上述 7 个矿床的氧化锰矿石样品 110 余件。通过矿相学研究初步确定矿石矿物组成、结构构造和纯度(是否有未彻底风化的原生矿物)。样品处理:破碎、超声波清洗、烘干,手选 30~50 个单矿物集合体颗粒,利用粉晶 X 射线衍射、扫描电子显微镜和电子显微探针每个样品进行系统的物相分析、形貌观察和成分分析。获得适用于  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年的单矿物样品,主要为隐钾锰矿和钡锰矿(统称

钾锰矿)。将这些样品与用于中子通量监测的标准样品 Fish Canyon 透长石( $28.02 \pm 0.08$  Ma)<sup>[8]</sup>一起,在美国俄勒冈州立大学放射研究中心的 B-1 CLICIT 反应堆进行照射,照射时间为 14 h。冷却 2~3 个月后,用 MAP 215 稀有气体质谱仪进行激光阶段加热氩同位素分析。除少数样品仅分析 1 个颗粒外,多数样品分析了两三个颗粒,以验证分析结果的重现性;总共分析 110 余个单矿物颗粒。详细的分析方法和流程参见文献[9]。根据文献[10],本文对坪年龄的定义为:2 个或 2 个以上的连续加热阶

段所释放的<sup>39</sup>Ar<sub>K</sub> 占总量的 50%以上,且每个阶段的表观年龄在 2 水平上一致。似坪年龄的定义有两层含义:1)两个或更多的连续加热阶段所释放的<sup>39</sup>Ar<sub>K</sub> 占总量的 50%以上,每个阶段的表观年龄在 90%信度水平上一致;2)加热阶段所释放的<sup>39</sup>Ar<sub>K</sub> 略少于 50%,但表观年龄在 95%信度水平上一致。

## 4 结 果

图 1 为由激光阶段加热分析所得到的六种表观年龄谱。

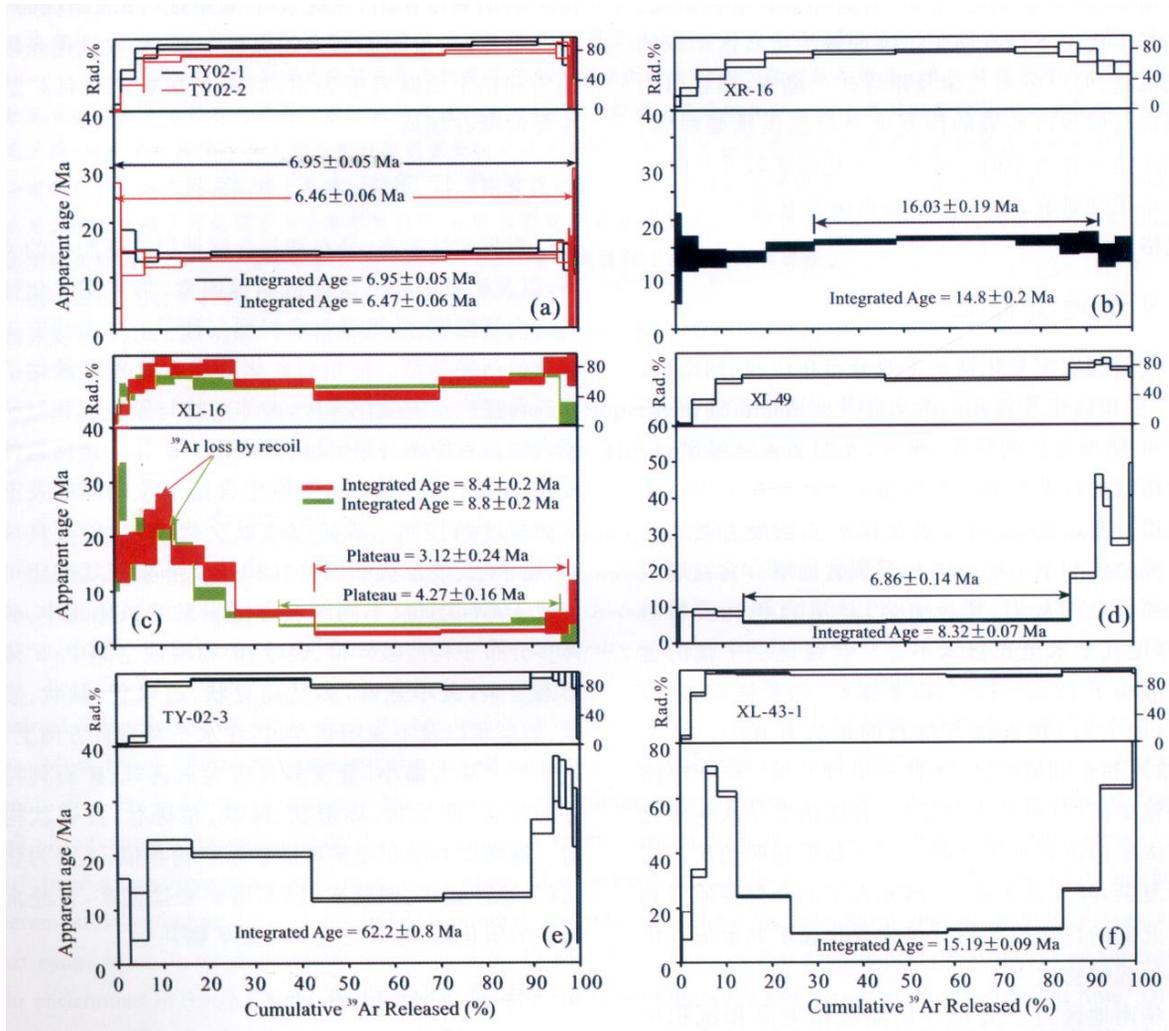


图 1 华南氧化锰矿<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 表观年龄谱主要类型

Fig. 1 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar spectra of supergene Mn-oxides from South China

不同类型年龄谱的特征如下:

(1) 平坦型年龄谱。这是最主要的一种年龄谱(图 1a),通常由 3~8 个连续加热阶段构成一个相当平坦的表观年龄谱,这些阶段所释放的<sup>39</sup>Ar 量占<sup>39</sup>Ar 总量的 70%~95%,各阶段的表观年龄在误

差范围内完全一致,其加权平均值代表该样品的坪年龄。这种年龄谱反映钾锰矿晶体中放射性成因氩保存完好,中子照射过程中没有发生过<sup>39</sup>Ar 的反冲丢失,样品中也没有老矿物的混染<sup>[9,11]</sup>,因此其坪年龄代表该样品的生长年龄。

(2) 阶梯状年龄谱。这种年龄谱通常是因钾锰矿样品中存在多个生长环带,且不同环带的结晶程度和热稳定性不同,因此各生长环带在不同的激光功率水平下释气。如果早期生长的环带热稳定性强,则形成上升型阶梯状年龄谱(图 1b);反之则形成下降型阶梯状年龄谱。多数情况下这种阶梯状年龄谱仍然给出了有意义的坪年龄或似坪年龄(图 1b)。当不同环带的表观年龄相差较大时,样品很可能不会给出坪年龄或似坪年龄,但激光阶段加热分析仍然有可能给出有意义的年龄信息:最年轻和最老环带表观年龄之差代表该样品中钾锰矿物生长持续时间的上限<sup>[9,11]</sup>。

(3) 正偏分布年龄谱。这种年龄谱在低温阶段出现异常老的表观年龄,随后表观年龄逐渐减小,最终在中高温阶段变得稳定并可能给出坪年龄或似坪年龄(图 1c)。这种年龄谱是样品在照射过程中出现过<sup>39</sup>Ar 反冲丢失的体现<sup>[10]</sup>,因为晶体边缘或最外层最容易发生<sup>39</sup>Ar 反冲,这些部位在加热过程中最早释气,当部分<sup>39</sup>Ar 反冲丢失时,根据<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄的计算公式 $[t = \ln(1 + J \times^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar})]$ ,所对应阶段的表观年龄即增大。当<sup>39</sup>Ar 反冲丢失程度较大时,将难以获得坪年龄甚至似坪年龄;若样品仅发生过轻微的<sup>39</sup>Ar 反冲丢失,则阶段加热分析仍然可能给出较好的坪年龄(图 1c)。

(4) 负偏分布年龄谱。这种年龄谱在高温阶段出现异常老的表观年龄,而中低温阶段的表观年龄明显年轻并可能给出坪年龄和似坪年龄(图 1d)。对这种年龄谱最可能的解释是样品中混入了极少量原生矿物(风化残余),且原生矿物的热稳定性明显比表生钾锰矿强,因此二者在不同的温度(激光功率)条件下释气,中低温阶段主要是或只有表生矿物的释气,而高温阶段可能同时有原生和表生矿物的释气。但当混入的原生矿物较多或原生与表生矿物的热稳定性差别不大时,则阶段加热分析很难给出有地质意义的年龄信息。

(5) 马鞍状年龄谱。其特点是低温和高温阶段的表观年龄明显比中温阶段的表观年龄大(图 1e),表明样品中可能有过剩氩<sup>[10]</sup>,过剩氩的来源可能是原生含锰矿物在遭受氧化分解时释放并进入表生矿物<sup>[9]</sup>。

(6) 复杂年龄谱。可能同时出现<sup>39</sup>Ar 的反冲丢失、多个生长环带、过剩氩的存在或老矿物的污染等情况,致使最终的阶段加热年龄谱变得非常复杂(图 1f),这时通常难以获得有意义的年龄信息。

## 5 讨论和结论

在所分析的 110 个单矿物中,绝大多数给出了很好的坪年龄或似坪年龄。少数几个样品虽然没有给出坪年龄或似坪年龄,但其表观年龄谱同样提供了有地质意义的年龄信息。对给出坪年龄的样品,坪年龄值与对应的等时线年龄和最大概率年龄在误差范围内吻合(图 2),证明分析结果可靠<sup>[9,11]</sup>。上

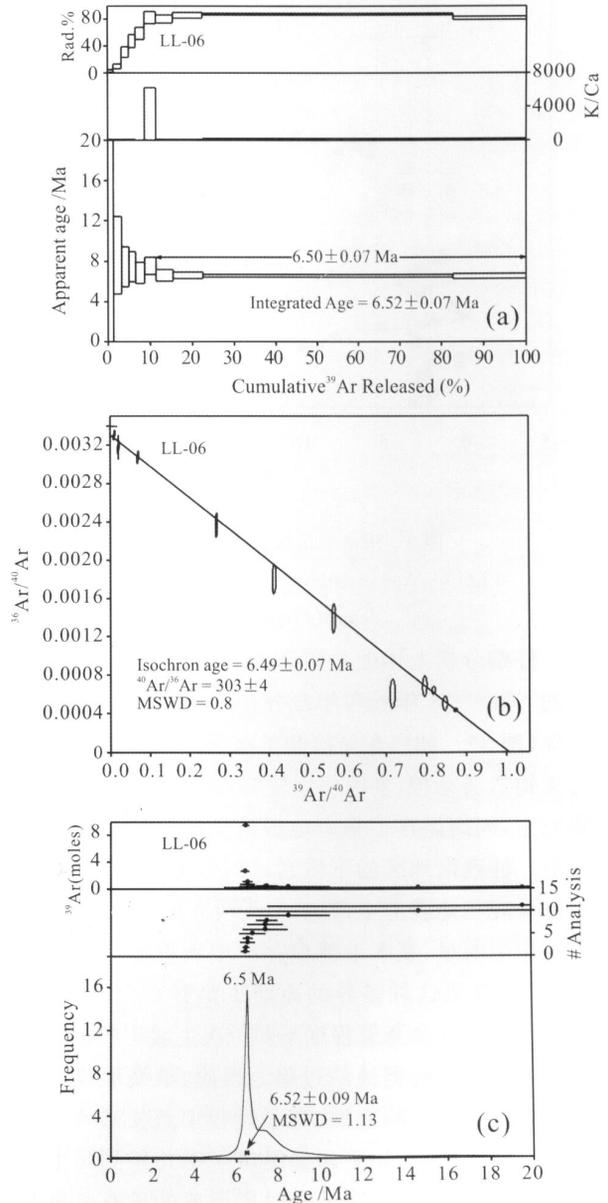


图 2 同一样品通常具有完全一致的坪年龄(a)、等时线年龄(b)和最大概率年龄(c)

Fig. 2 The plateau (a), isochron (b) and ideogram age (c) from the same sample are reproducible, attesting to the reliability of the results

述 7 个矿床的定年结果所获得的坪年龄或似坪年龄介于  $23.64 \pm 0.29$  Ma 和  $0.48 \pm 0.17$  Ma 之间 (图 3)。这表明华南地区大规模的化学风化和锰矿床次生富集早在渐新世末期就已开始,并持续到更新世末期。如果考虑到后期剥蚀作用对风化壳和钾锰矿保存程度的影响(研究区大部分风化壳上部均已被剥蚀),则华南地区氧化锰矿的成矿时代至少可以上推到渐新世早期甚至始新世。

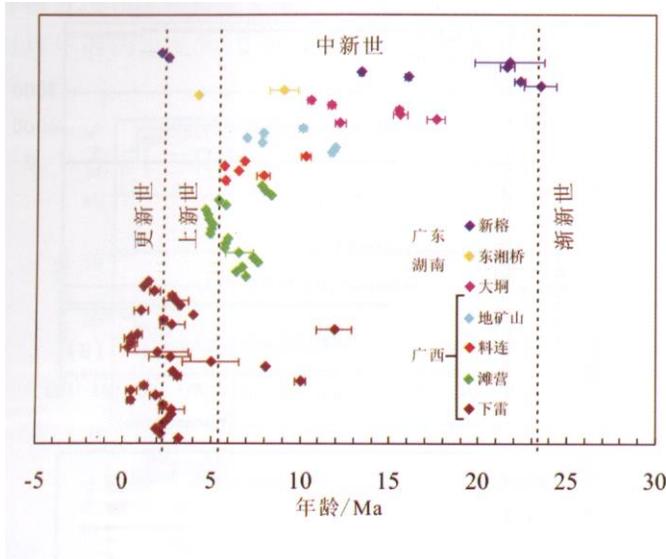


图 3 华南氧化锰矿成矿年龄分布特征

Fig. 3 Age distribution of the supergene Mn-oxide deposits from South China

仔细分析上述七个矿床的年龄分布可见,各矿床的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄和年龄分布范围有不同程度的差异(图 3)。如广东新榕锰矿由于产于罗定盆地并远离构造活动带,剥蚀作用较弱,区域地貌以低山丘陵为主,因而保存了华南地区最老的氧化锰矿成矿年龄。桂西南地区的下雷锰矿因邻近云贵高原,以峰林和峰丛地貌为主,晚新生代构造活动强烈,隆升剥蚀作用明显,基本未能保存早中新世的年龄信息(图 3)。造成这种差异的原因主要有二个:1)各矿区的剥蚀程度和开采程度不同。次生锰矿的形成过程同时又是其被剥蚀的过程。因此,早期形成的锰矿可能已在漫长的剥蚀、夷平过程中遭受破坏。另一方面,由于大部分矿区都经历了十几年到几十年的开采,地质历史时期某些时段形成的矿石已被开采殆尽,其年代记录难以完全恢复。这在大垌锰矿与料连和滩营锰矿的年龄分布差异上得到印证:前者开采程度低,地表可见早期形成的氧化锰矿石,使早中新世的成矿年龄信息得以保存;而后者已开采至地下 30~50 m,早期风化记录被破坏,因此仅获

得晚中新世的年龄(图 3)。2)采样的系统性和完整性差异。风化前锋的向下发展使得愈往深处,形成的次生矿物愈年轻。这时只有通过系统取样,才能获知比较完整的风化历史和矿床次生富集过程。由于大部分矿区的开采还没有暴露出最深部的矿石,目前尚不能获得最年轻的样品。相反,下雷锰矿的开采已达几百米深,因而获得了距今 0.4 Ma 的氧化锰矿成矿年龄(图 3)。

正常情况下,风化前锋自上而下拓展,形成具有倒转时间序列的风化壳剖面,即较老的表生矿物一般出现在风化壳上部,而年轻样品则出现在风化壳下部。这种年龄分布在广西钦州地区表现较清晰。那里的氧化锰矿总体上具有上老下新的年龄分布,据此计算出风化前锋向下拓展的速率大致为 9.0 m/Ma。这一结果与澳大利亚芒特·艾莎地区(3.8 m/Ma)<sup>[12]</sup>和南美巴西 Minas Gerais 地区(8.9 m/Ma)<sup>[13]</sup>的情况吻合,也与根据地球化学物质平衡方程计算得到的圭亚那地区的风化速率(8 m/Ma)<sup>[14]</sup>一致。但广西下雷和广东新榕地区氧化锰矿的年龄分布则比较复杂:较老的年龄可以出现在风化剖面深部,较年轻的年龄则可能在地表(风化剖面顶部);同一海拔高度的样品年龄可能差别很大。研究表明,这种复杂的年龄分布与以下两个因素有关。一是由于这些矿区氧化锰矿的形成受断裂裂隙控制,断裂裂隙发育的地方基岩破碎强烈,渗透率增大,风化溶液容易向下渗透,导致风化前锋在这些地方优先发展。形成了反抛物面型的风化壳剖面。因此,同一时间沉淀的锰氧化物可以出现于风化壳剖面的不同深度,导致复杂的年龄分布。另一个因素可能是周期性的化学风化。由于锰氧化物的沉淀和溶解严格受地下水酸碱度和氧化还原条件的控制,因此,早期沉淀的四价锰氧化物因物理化学条件(pH, Eh)的变化而发生溶解,并以  $\text{Mn}^{2+}$  的形式向下迁移,在合适的深度重新沉淀,使氧化锰矿在垂向剖面上的年龄分布复杂化。

以上研究表明,次生矿床的富集过程(或成矿作用)漫长而复杂,要全面恢复区域化学风化和氧化锰矿的形成过程,必须同时在平面上和剖面上进行系统取样和大量的年龄测定,才有可能比较客观和全面地恢复区域化学风化历史和矿床次生富集过程。年代学研究所揭示的次生氧化锰矿成矿年龄在垂向和平面上的分布无论是对单个矿床的深部潜力评

价,还是对区域成矿远景分析都有重要的指导意义。此外,一个具有一定规模的次生氧化锰矿,需要有比较稳定的构造条件(风化速率大于剥蚀速率)和较有利的古气候条件(使水-岩反应得以持续进行),经过上千万年的漫长化学风化才能形成。这与多数原生热液矿床不同:许多热液矿床的形成可在几十万年至1~2 Ma的短暂时间内就得以完成<sup>[15,16]</sup>。另外,通过对具有环带状构造的氧化锰矿样品进行亚样品定年,获得了表生条件下锰结核的平均生长速率为 $(1\sim 8)\times 10^{-3}\text{ mm/Kar}^{[11]}$ ,与大洋铁锰结核或富钴锰结核的生长速率一致。

对次生氧化锰矿进行精确的年代学研究还可以为区域古气候和古环境的恢复与重建提供关键的年代学制约<sup>[1,11]</sup>。

**致 谢:**中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室张素新研究员、刘慧芳工程师和中国地质科学院矿产资源研究所陈振宇工程师在扫描电镜观察和电子探针分析过程中给予热情帮助和指导,谨致谢忱。

#### 参考文献 (References) :

- [1] J W Li, Vasconcelos P, Duzgoren-Aydin N, D R Yan, W Zhang, X D Deng, X F Zhao, Z P Zeng, M A Hu. Neogene weathering and supergene manganese enrichment in subtropical South China: An  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  approach and paleoclimatic significance[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 256: 389 - 402.
- [2] J W Li, Vasconcelos P M, W Zhang, X D Deng, Duzgoren N S, D R Yan, J Q Zhang. Timing and duration of supergene mineralization at the Xinrong manganese deposit, western Guangdong Province, South China: Cryptomelane  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating[J]. *Mineralium Deposita*, 2007, 42: 361 - 383.
- [3] 茹廷锵, 韦灵敦, 树皋. 广西锰矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 310.  
Ru Tingqiang, Wei Lingdun, Shu Gao. Geology of manganese ore deposits in Guangxi [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 310. (in Chinese)
- [4] 黄圭成, 汪雄武, 杨世义, 陈龙清, 凌井生. 广东省新榕锰矿地质特征及成因探讨[J]. *矿床地质*, 2001, 20: 243 - 250.  
Huang Guicheng, Wang Xiongwu, Yang Shiyi, Chen Longqing, Ling Jingsheng. Geological characteristics and genesis of the Xinrong manganese deposit, Guangdong Province [J]. *Mineral Deposits*, 2001, 20: 243 - 250. (in Chinese with English abstract)
- [5] 广西壮族自治区地质矿产局. 广西壮族自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1982: 980.  
Geological Bureau of Guangxi. Regional geology of Guangxi province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982: 980. (in Chinese)
- [6] X M Li, Y J Wang, K X Tan, T P Peng. Meso-Cenozoic uplifting and exhumation on Yunkaidashan: Evidence from fission track thermochronology [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50: 903 - 909.
- [7] 侯宗林, 薛友智. 中国南方锰矿地质[M]. 成都: 四川科学出版社, 1996: 369.  
Hou Zonglin, Xue Youzhi. Manganese ore deposits of the Yangtze Platform [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996: 364. (in Chinese with English abstract)
- [8] Renne P R, Swisher C C, Deino A L, Karner D B, Owens T L, DePaolo D J. Intercalibration of standards, absolute ages and uncertainties in  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating [J]. *Chemical Geology*, 1998, 145: 117 - 152.
- [9] Vasconcelos P.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of supergene processes in ore deposits [A]. Lambert D D, Ruiz J. Application of radiogenic isotopes to ore deposit research and exploration [J]. Society of Economic Geologists, Littleton, 1996: 73 - 13.
- [10] McDougall I, Harrison T M. Geochronology and thermochronology by the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Method [M]. London/ New York: Oxford University Press, 1998, 212.
- [11] J W Li, Vasconcelos P. Cenozoic continental weathering and its implications for the palaeoclimate: Evidence from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of supergene K-Mn oxides in Mt Tabor, central Queensland, Australia [J]. *Earth and Planetary Science Letters*. 2002, 200: 223 - 239.
- [12] Vasconcelos P M, Conroy M. Geochronology of weathering and landscape evolution, Dugald River valley, NW Queensland, Australia [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2003, 67: 2913 - 2930.
- [13] Carmo I D, Vasconcelos P M.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology constraints on late Miocene weathering rates in Minas Gerais, Brazil [J]. *Earth and Planetary Science Letters*. 2006, 241: 80 - 94.
- [14] Freyssinet P, Farah A S. Geochemical mass balance and weathering rates of ultramafic schists in Amazonia [J]. *Chemical Geology*. 2000, 170: 133 - 151.
- [15] J W Li, Vasconcelos P M, J Zhang.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  constraints on a temporal link between gold mineralization, magmatism, and continental margin transtension in the Jiaodong gold province, eastern China [J]. *Journal of Geology*. 2003, 111: 741 - 751.
- [16] J W Li, X F Zhao, M F Zhou, C Q Ma, Vasconcelos P M, Deng X D, Souza Z S, Zhao Y X. Origin of the Tongshankou porphyry and skarn copper-molybdenum deposit, Daye district, eastern Yangtze craton, eastern China: Geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Hf isotopic constraints [J]. *Mineralium Deposita*, 2008, 43: 315 - 336.