# 红土风化壳形成过程中岩石体积变化和质量迁移*

# Experiment Study on Au Adsorbed by Minerals and Its Significance in Mineralization Process of Lateritic Gold Deposit

王 燕[1,2] 谭凯旋[1] 刘顺生[1] 陈梦熊[3]

(1 中国科学院长沙大地构造研究所，湖南 长沙 410013；2 广东有色地质勘查研究院，广东 广州 510080；
3 有色金属矿产地质调查中心，北京 100814)

Wang Yan[1.2], Tan Kaixuan[1], Liu Shunsheng[1], Chen Mengxiong[3]

(1 Changsha Institute of Geotectonics, Chinese Academy of Science, Changsha 410013, Hunan,China;
2 Guangdong Non-ferrous Metal Geological Survey Institute, Guangzhou 510080, Guangdong, China;
3 China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100814, China)

摘 要 前人在讨论风化壳中组分的富集（亏损）和迁移特征时，大多假设岩石是等体积变化的。事实上，在风化过程中由于岩石组分的淋失和迁移，必然引起岩石体积的变化。因此，要比较准确地分析风化过程中组分的质量迁移和变化特征，必须考虑岩石体积变化的影响。本文通过对国内蛇屋山等红土型金矿风化壳中主量元素、微量元素、稀土元素分析数据和岩石体积等相关计算，定量地分析研究了风化壳形成过程中，岩石的体积的变化规律；组成风化壳的主要元素、微量元素及稀土元素等组分等质量迁移规律。

关键词 风化壳 淋滤作用 吸附作用 质量迁移 表生富集作用 红土型金

## 1 岩石风化前与风化后之间的质量变化

岩石中任何一种组分或元素在岩石风化前与风化后之间的关系及其质量变化可由下式表示(A.W.Mann, 1984, Febrice et al., 1997, Freyssinet et al., 1990)。

$$\triangle x_i=(m^a/m^b)\times x_i^a - x_i^b \quad (1)$$

式中$\triangle x_i$为组分或元素 i 的质量变化，$m^a/m^b$ 为岩石总的质量变化率($F_m$)，$x_i^a$为风化后组分 i 的浓度，$x_i^b$为风化前组分 i 的浓度。由于 $m^a/m^b$ 的值未知，采用密度 $d$ 和体积 $v$ 来代替质量 $m$：

$$\triangle x_i=(v^a/v^b)\times(d^a/d^b)\times x_i^a - x_i^b \quad (2)$$

$v^a/v^b$ 为体积变化率（$F_v$），$d^a/d^b$ 为密度变化率（$F_d$）。

如果某一组分是不活动的，即在岩石的风化过程中既没有获得，也没有丢失，岩石的体积变化可以由假设 $\Delta x_i=0$ 而获得。此时的体积变化率称为零质量变化体积因子（$F_v^0$），其计算公式如下（饶纪龙，1979）：

$$F_V^0=(d^b\times x_i^b)/(d^a\times x_i^a) \quad (3)$$

若在风化过程中存在一组相互不活动的组分，这些组分可以根据在同一样品中具相似的 $F_v^0$ 值来进行判别。如果同一组分的 $F_v^0$ 值在一组相关样品中的变化性很小，可认为该组分在风化壳过程中是不活

* 基金项目：国家自然科学基金项目（编号：70171057）和中国科学院知识创新工程重要方向项目（编号：KZCX2-101）资助。
第一作者简介 王 燕，男，1955 年生，教授级高级工程师，主要从事矿产资源勘查项目的生产科研及技术管理工作。

动的。因此，多个不活动组分或多个样品的 $F_v^0$ 值的平均值即为样品的体积变化率。

对于风化过程中活动组分其 $F_v^0$ 值是变化的，如果某组分在一组样品的 $F_v^0$ 值变化较大，则可认为是活动组分，由（2）式可计算出风化过程中的质量变化，$\Delta x_i>0$ 为获得(富集)，$\Delta x_i<0$ 为丢失。

## 2　风化壳中主量元素、微量元素及稀土元素的含量特征

为了研究风化壳不同部位的主量元素和微量元素的含量的空间变化性，利用蛇屋山等红土型金矿风化壳的样品的化学分析结果，对于主量元素和微量元素的 $F_v^0$ 值（表 1）在红土剖面垂向上的变化，进行

表 1　蛇屋山金矿风化壳部分主量元素的 $F_v^0$ 值

| 分带 | 深度 / m | 岩　性① | 密度 | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | FeO | $Na_2O$ | CaO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ⅰ | 0.0～0.7 | 褐红色含硅化构造岩残块粘土 | 1.88 | 0.87 | 1.61 | 1.95 | 8.14 | 2.44 | 85.90 |
| | 0.7～1.2 | 褐红色含硅化构造岩残块粘土 | | 0.76 | 2.61 | 2.50 | 3.93 | 2.44 | 107.38 |
| | 1.2～2.4 | 褐红色网纹状粘土 | | 1.35 | 0.72 | 0.79 | 26.29 | 4.88 | 31.43 |
| | 2.4～3.2 | 褐红色蠕虫状或斑块状粘土 | | 1.29 | 0.78 | 0.76 | 28.48 | 2.03 | 34.83 |
| Ⅱ | 3.2～4.3 | 褐红色蜂窝状硅化构造岩残块 | 2.52 | 0.56 | 2.00 | 1.98 | 3.00 | 4.55 | 106.81 |
| | 4.3～7.1 | 褐红色似网纹状硅化构造岩残块 | | 0.54 | 2.86 | 3.34 | 4.11 | 1.40 | 96.13 |
| | 7.1～8.7 | 土黄色硅化构造岩残块 | | 0.51 | 6.24 | 4.88 | 3.31 | 1.52 | 160.22 |
| | 8.7～10.3 | 土黄色硅化构造岩残块 | | 0.51 | 5.74 | 3.39 | 8.50 | 6.07 | 240.33 |
| Ⅲ | 10.3～13.6 | 褐红色含碎块粘土 | 1.97 | 0.83 | 1.57 | 2.05 | 2.47 | 0.97 | 72.34 |
| | 13.6～16.0 | 褐红色含碎块粘土 | | 0.88 | 1.33 | 1.87 | 3.26 | 0.78 | 9.92 |
| | 16.0～19.0 | 褐红色-土黄色含碎块粘土 | | 0.88 | 1.31 | 0.99 | 21.75 | 3.33 | 64.72 |
| | 19.0～23.2 | 土黄色夹白色高岭石团块粘土 | | 1.31 | 0.68 | 0.75 | 13.05 | 3.88 | 33.24 |
| | 23.2～26.1 | 土黄色含碎块（屑）粘土 | | 0.90 | 1.25 | 1.05 | 8.58 | 2.33 | 47.30 |
| | 26.1～28.4 | 土黄色夹白色高岭石团块粘土 | | 1.04 | 0.91 | 0.94 | 11.65 | 5.82 | 45.54 |
| | 28.4～30.5 | 土黄色含碎块（屑）粘土 | | 0.88 | 1.23 | 1.15 | 27.18 | 23.30 | 76.86 |
| Ⅳ | 30.5～33.4 | 土黄色夹灰绿色碎块粘土 | 2.06 | 0.79 | 1.46 | 1.57 | 11.55 | 3.71 | 34.59 |
| | 33.4～35.9 | 褐红色夹灰黑色碎块粘土 | | 0.82 | 1.24 | 1.29 | 4.33 | 2.48 | 61.89 |
| | 35.9～38.6 | 灰绿色碎块粘土 | | 0.82 | 1.31 | 1.36 | 9.75 | 3.18 | 36.75 |
| | 38.6～41.9 | 灰黑色含黄铁矿碎块粘土 | | 0.96 | 1.04 | 1.19 | 0.67 | 0.47 | 15.08 |
| | 41.9～44.3 | 土黄色夹灰黑色碎块粘土 | | 0.95 | 1.07 | 1.09 | 9.17 | 1.24 | 4.72 |
| Ⅴ | 44.3～46.7 | 灰色含残留硅化构造岩粘土 | 2.22 | 0.71 | 1.66 | 2.84 | 2.71 | 4.14 | 77.94 |
| | 46.7～48.1 | 含残留黄铁矿化碳酸盐岩质碎裂岩 | | 1.15 | 1.15 | 1.15 | 1.15 | 1.15 | 1.15 |
| | 48.1～49.1 | 灰色含残留黄铁矿化粘土岩碎裂岩 | | 0.79 | 1.24 | 1.44 | 0.62 | 2.58 | 60.62 |
| | 49.1～50.5 | 灰黑色含残留碳酸盐岩质碎裂岩 | | 1.05 | 3.99 | 2.64 | 18.09 | 1.72 | 0.82 |
| | 基岩 | 矿化蚀变碳酸盐岩 | 2.55 | | | | | | |

注：① 据胡立山，蛇屋山金矿风化壳结构、元素地球化学行为及地质找矿模型研究，博士毕业论文，2000。

了系统的分析及计算，结果表明风化壳中主量元素和微量元素的 $F_v^0$ 值无论是在整个剖面还是在其中的某一风化带中均有较大的差异。说明不同组分和元素在风化过程中发生迁移作用，红土风化壳的形成过程事实上是这些组分在表生条件上重新分配的演化历史。

不同的元素组分在风化壳形成过程中均发生了质量迁移，但程度明显不同。例如，风化壳中的主量元素中以 CaO 的 $F_v^0$ 值变化幅度最大（1.15～240.33），微量元素中以 Au（0.05～28.88）、Hg(0.1～315.07)、Sr(0.62～52.83)的 $F_v^0$ 值变化幅度最大，达 2～3 个数量级以上，说明它们在风化过程中是强烈活动的组分。因此，利用这些组分计算所得的 $F_v^0$ 值不能代表岩石在风化过程中的真实体积变化。

稀土元素的地球化学分析及计算结果表明，同一风化壳不同部位的重稀土元素间的分异不明显，表明重稀土元素在风化过程中的质量迁移作用很小。因此，利用风化壳各带的重稀土元素数据所计算得出的 $F_v^0$ 平均值基本上代表了岩石在风化过程中的体积变化值。

以第一风化带为例，连续采取的 5 个样品的重稀土元素分析数据所计算的 40 个 $F_v^0$ 值的范围为 0.13～0.35，其变异系数仅为 5.2%，这也说明重稀土元素在风化过程中可看作不活动元素。由此计算得出各风化带的 $F_v^0$ 平均值分别为：Ⅰ带 0.19，Ⅱ带 0.77，Ⅲ带 0.17，Ⅳ带 0.14，Ⅴ带 0.42。这些也就是各风化带岩石在风化过程中的体积变化率，因此在风化过程中由于一些组分的淋失而引起了岩石体积减小（体积

变化率 < 1)。

## 3 风化壳中主要组分的质量迁移规律

表 2 蛇屋山金矿风化壳剖面部分微量元素的质量迁移量

| 分带 | 深度/m | Au | As | Ag | Hg | Sb | Cu | Sr | Co |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ⅰ | 0.0～0.7 | -170.73 | -1330 | -0.26 | -36.4 | -69.6 | -32.6 | -1697 | -24.5 |
| | 0.7～1.2 | -186.91 | -1340 | -0.27 | -36.7 | -69.9 | -29.1 | -1733 | -25.5 |
| | 1.2～2.4 | -185.13 | -1333 | -0.27 | -36.5 | -70.3 | -28.0 | -1699 | -25.5 |
| | 2.4～3.2 | -175.21 | -1329 | -0.27 | -36.2 | -67.9 | -27.8 | -1650 | -25.6 |
| Ⅱ | 3.2～4.3 | -51.12 | -1098 | -0.13 | -7.4 | 31.6 | -22.3 | -1500 | -21.7 |
| | 4.3～7.1 | -19.84 | -1178 | -0.08 | -21.3 | 8.6 | -20.7 | -1321 | -24.8 |
| | 7.1～8.7 | 1119.57 | -69.8 | -0.06 | -13.0 | 64.1 | 5.8 | -796 | -19.7 |
| | 8.7～10.3 | -25.47 | -1058 | -0.09 | -12.0 | 7.4 | -19.3 | -1544 | -23.6 |
| Ⅲ | 10.3～13.6 | -0.04 | -1283 | -0.26 | -34.8 | -62.0 | -28.3 | -1659 | -26.6 |
| | 13.6～16.0 | -149.76 | -1303 | -0.25 | -35.9 | -64.0 | -29.7 | -1661 | -26.5 |
| | 16.0～19.0 | -17.77 | -1295 | -0.24 | -35.6 | -61.6 | -29.2 | -1623 | -26.4 |
| | 19.0～23.2 | -164.60 | -1324 | -0.26 | -36.5 | -69.4 | -29.2 | -1710 | -25.6 |
| | 23.2～26.1 | -83.17 | -1251 | -0.26 | -36.6 | -61.8 | -29.7 | -1589 | -26.5 |
| | 26.1～28.4 | -29.98 | -1303 | -0.25 | -35.7 | -61.6 | -29.9 | -1622 | -26.1 |
| | 28.4～30.5 | -33.53 | -1296 | -0.26 | -35.6 | -59.2 | -29.8 | -1628 | -26.5 |
| Ⅳ | 30.5～33.4 | -29.90 | -1247 | -0.26 | -33.4 | -58.6 | -30.4 | -1497 | -24.1 |
| | 33.4～35.9 | -121.51 | -1293 | -0.25 | -35.6 | -63.8 | -27.0 | -1692 | -23.3 |
| | 35.9～38.6 | 13.07 | -1216 | -0.27 | -34.3 | -59.3 | -29.2 | -1539 | -23.6 |
| | 38.6～41.9 | 39.09 | -1194 | -0.23 | -32.0 | -58.8 | -30.2 | -1340 | -23.1 |
| | 41.9～44.3 | 20.99 | -1319 | -0.21 | -34.0 | -67.1 | -31.5 | -1621 | -26.7 |

为了研究风化壳中主要及微量元素组分的质量迁移，采用（2）式（饶纪龙，1979）并利用前述风化壳各带的体积变化率值，进一步计算蛇屋山金矿风化壳剖面中各主要组分和微量元素质量迁移量(表 2)。

由表 2 表明，在主量元素组分中，以 $SiO_2$、$Al_2O_3$、CaO、$Fe_2O_3$ 等组分的质量迁移量最大，FeO、$K_2O$、MgO、$P_2O_5$ 等组分居中，$Na_2O$、MnO、$TiO_2$ 的迁移量最小。并且这些氧化物组分除 $SiO_2$ 在部分层段为质量增盈外，其余均为质量迁出（亏损），显然这些组分的大量迁出（亏损）将导致风化壳岩石的体积减小。

$SiO_2$ 除在第Ⅱ风化带中为质量迁进（增盈）外，在其余各带中均为质量迁出（亏损），并且在整个风化壳剖面中质量迁出量明显大于质量增盈量（图 1），即总体上仍为质量迁出（亏损）。

自地表向下，风化壳中 $SiO_2$ 的质量迁出（亏损）量具有减小的趋势。在整个风化壳剖面中均为质量迁出(亏损)，并且其迁移（亏损）量随深度变化比较复杂，在第Ⅱ带、第Ⅲ带中部和第Ⅴ带的质量迁出（亏损）量比其它部位稍低。

CaO 和 $K_2O$ 的质量迁移在风化壳剖面上的变化很小，其中第Ⅰ～Ⅳ带基本一致，仅在第Ⅴ带略有减小 (图 1)，而 MgO、$Na_2O$、$TiO_2$、MnO、$P_2O_5$、FeO 等氧化物组分在整个风化壳剖面中的质量迁移（亏损）量随深度的变化都很小。

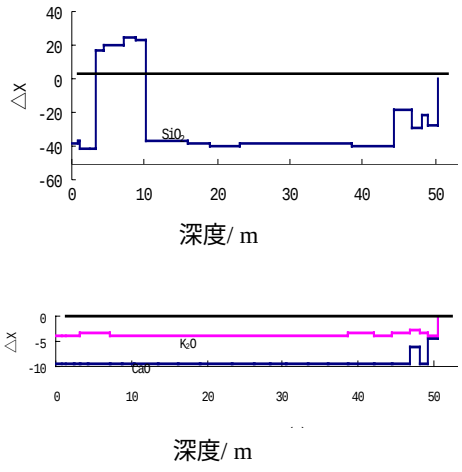



图 1 蛇屋山金矿风化壳剖面部分主量元素组分的质量迁移即随深度的变化

金在风化壳剖面中的质量迁移比较复杂（Ibon Guimaraes Carvalho etc., 1991, 涂光炽等，1998），在第Ⅱ和Ⅴ带中为质量迁进（增盈），而在其余各带中为质量迁出（亏损）（图 2)。图中可见，在整个风化壳剖面上金的迁出（亏损）量与迁进（增益）量基本一致，说明金的富集与成矿的物质来源主要是风化壳其余部位中金的溶解和迁出。

风化壳中微量元素中 As、Ba、Sr 的迁移量比较大，次为 Hg、Sb、Mo、Ni、Cu、Pb、Tl 等，Ag 和 Bi 的迁移量最小。这些微量元素主要表现为质量迁出（亏损），As、Ag、Sr、Bi、Co、Ni、Tl 在整个剖面

上均为质量迁出（亏损），其余的如 Ba、Hg、Cu、Sb、Mo、Pb 等元素在个别层位出现质量增盈。

Sr 在整个风化壳垂向剖面上均为质量迁出(亏损)，但是其质量迁移量随深度的变化比较复杂(图 3)，在第Ⅱ和Ⅴ带中的迁移（亏损）量比其余层位小。As 和 Ba 的质量迁移特征基本相似（图 3），都是在第Ⅱ和Ⅴ带中的迁移（亏损）量较小。Hg 在第Ⅱ和Ⅴ带的质量迁出（亏损）量比其余层位要小，并在最底部出现了质量增盈（迁进）。

Sb 则在第Ⅱ带出现了质量增盈（迁进）。Cu 和 Pb 的质量迁移特征相同（图 3），都在第Ⅱ带的局部（相同部位）出现质量增盈（迁进），但增盈量很小。

Ag、Mo、Bi、Co 等元素均在第Ⅱ和Ⅴ带呈现质量迁移（亏损）量减小，在其余风化带的迁移（亏损）量一致。Ni 和 Tl 的质量迁移（亏损）量在整个风化壳剖面上变化不大。

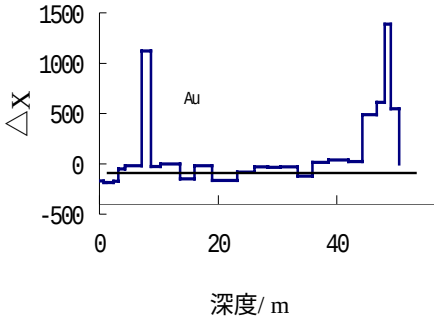



图 2　蛇屋山金矿风化壳剖面金的质量迁移及随深度的变化

## 4　主要认识与结论

风化过程中，由于组分的淋失和迁移导致岩石体积的变化，为了能够比较准确地研究风化过程中组分的质量迁移及其变化特征，必须考虑岩石体积变化对其的影响。

利用风化壳中不同层位中主量元素、微量元素及稀土元素分析数据，通过计算，可定量地分析风化过程中的岩石体积变化和组分的质量迁移规律。

蛇屋山等国内主要红土型金矿的表生风化过程中产生了强烈的物质迁移，在含金岩石的红土作用的地表氧化风化壳中，几乎所有氧化物和绝大多数微量元素均为质量迁出（亏损）。

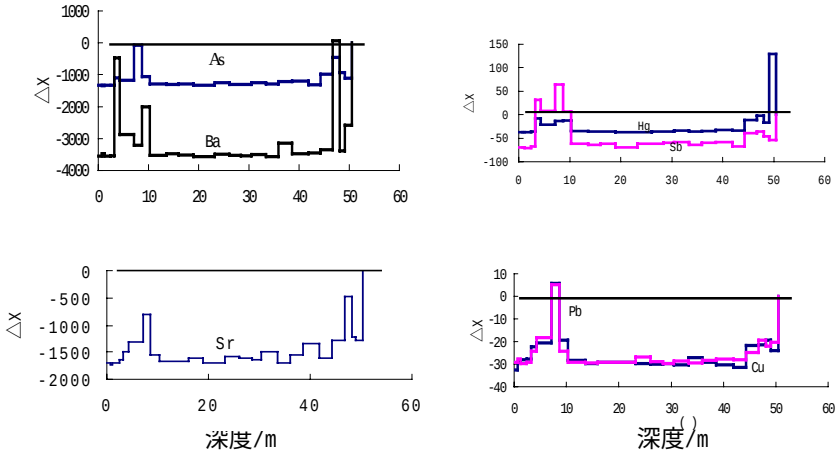



图 3　蛇屋山金矿风化壳剖面中部分微量元素的质量迁移及随深度的变化

红土风化壳中不同层位中组分的迁出和质量亏损引起了金的相对富集。表现为金主要在风化壳底部呈现质量迁进(增盈)而发生富集和成矿，其增益(成矿)量与迁出（亏损）量基本一致，说明红土型金矿中的 Au 等主要元素在风化过程中发生了明显的再分配及次生富集。

## 参　考　文　献

饶纪龙. 1979. 地球化学中的热力学[M]. 北京: 科学出版社.
涂光炽, 等. 1998. 低温地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
Man A W N. 1984. Mobility of Gold and Silver in Lateritic Weathering Profiles: Some Observations from Western Australia[J]. Economic Geology, 38~49.
Febrice C, et al. 1997. Gold: A tracer of the dynamics of tropical laterites[J]. Geology, 25(1): 81~84.
Freyssinet P, Lawtance L M and Butt C R M. 1990. Geochemistry and morphology of gold in lateritic profiles in savanna and semi-arid climates[J]. Chem. Geol., 84(1~4): 61~63.
Ibon G C, et al. 1991. Geochemical evolution of laterites from two areas of the semiarid region in Bahia State, Brazil. J. Geochem[J]. Explor, 20: 385~411.
Tue G Z, et al. 1998. Low temperature Geochemistry[M]. Beijing: Science Press.
Yao J L. 1979. Thermodynamics of Geochemistry[M]. Beijing: Science Press.