

碳酸盐岩上覆红色风化壳中风化组分 确定的一种新模式

季宏兵^{1,2)} 王世杰²⁾ 欧阳自远²⁾ 章 申¹⁾

(1)中国科学院地理科学与自然资源研究所,北京,100101;

2)中国科学院地球化学研究所环境国家地球化学重点实验室,贵州 贵阳 550002)

摘 要 确定化学风化剖面的风化组分来源是一个重要而又困难的问题,通过对贵州省平坝白云岩风化剖面中 Sr 同位素组成的研究,揭示了典型就位白云岩风化剖面的 Sr 同位素特征,验证 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 Nb/Sr 比率的图解模式对碳酸盐岩风化剖面的适用性,提出了 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 Nd/Sr 比率的图解新模式。研究认为,该模式不仅对白云岩的化学风化具有明显的指示意义,也更好地补充和限定了 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 Nb/Sr 比率的图解所反映出的矿物组分和风化过程。这一研究结果将为风化剖面中 Sr 同位素的定量研究提供重要的区分指标。

关键词 Sr 同位素 同位素与元素比率图解 化学风化组分 白云岩风化剖面 贵州

A New Model for Determining the Weathering Components in Red Weathering Crust over Dolomites

JI Hongbing^{1,2)} WANG Shijie²⁾ OUYANG Ziyuan²⁾ ZHANG Shen¹⁾

(1) Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing, 100101;

2) State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang, Guizhou, 550002)

Abstract It is important and difficult to determine the weathering components in a complex system. The authors examined the strontium isotopic composition of the Pingba dolomitic weathering profile in Guizhou, described the strontium isotope characteristics, verified the applicability of a $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus Nb/Sr model, and put forward a new $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus Nd/Sr model for the weathering profile. Studies show that the new model not only has clear indicating significance to chemical weathering of dolomitic rocks but also replenishes and qualifies the weathering components and weathering process reflected by the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus Nb/Sr model. The result will provide an important distinguished index for strontium isotope quantitative analysis in weathering profiles.

Key words strontium isotope weathering component dolomitic weathering profile Guizhou

通常认为物质的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 在生物和化学过程中,诸如相的分离、化学物种形成、蒸发、生物同化等过程中不发生分异(Graustein, 1989)。因此, Sr 同位素成为示踪物质来源,反映风化过程等是最有效的手段之一。例如,在区域风化剖面和土壤形成中利用它可解决诸如可交换阳离子的丢失、化学风化程度和风化速率等问题(Wadleigh等, 1985; Palmer等, 1992; 李春雷等, 1990; 杨杰东等, 2000; 马英军等, 2001)。

在化学风化过程中, Rb 和 Sr 的地球化学行为

显著不同,其比值是衡量化学风化程度的良好地球化学指标(Dasch, 1969; 陈骏等, 1998; Chen等, 1999)。同时,化学风化也可以造成风化物质与未风化物质之间的 Sr 同位素组成不同,或者是因为不同 Rb/Sr 比值的原生矿物优先风化的结果(陈骏, 1998; Martin等, 1999; Chen等, 1999)或者是受离子交换过程的影响(Miller等, 1993; Borg等, 1996; Bullen等, 1997)。因此,对一个复杂的自然系统,如何确定风化组分中 Sr 同位素组成的来源,是一个值得研究和探讨的问题。例如,一些学者利用风化物

质的弱酸淋滤组分(Miller 等 1993 Blum 等 1997), 利用在风化剖面中相邻层中 Sr 的质量平衡(Bailey 等 1996)或利用河流中基流的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值(Clow 等 1997)等来代表端元风化组分。虽然它们都对各自研究的事例是有效的, 但是由于不同区域地形、地貌、水文和风化特征等因素是千差万别的, 从而制约着它们的广泛运用。而目前利用 Sr 同位素研究风化作用的关键问题是, 如何确定来自不同土壤层序列 或者来自不同源岩矿物的确切贡献(Blum 等, 1997, Innocent 等, 1997)。在这方面热带、亚热带地区的红土特别有意义, 因为在它们的形成过程中有非常大的化学分异发生。最近, 由 Bullen 等(1999)提供了⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与 Nb/Sr 比率的图解模式, 能较好的确定花岗岩风化壳中风化组分的 Sr 来源。但是这种模式能否广泛适用, 且对其他岩类的风化作用是否有指示意义的研究工作尚未开展。

笔者选择处于亚热带贵州地区的一个红色风化壳, 研究其在化学风化过程中 Sr 同位素的演化特征, 验证⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与 Nb/Sr 比率的图解模式在碳酸

盐岩风化剖面形成中的适用性, 并提出一个新的模型来限定碳酸盐岩风化过程中风化层中不同组成矿物对 Sr 同位素的贡献特征。

1 采样与分析方法

1.1 剖面特征和样品采集

中国贵州省亚热带温湿岩溶区的许多低山地区发育有黄色酸性风化壳, 其上发育黄壤、红壤、砖红壤等, 属于裸露地表持续发育的古老风化壳(席承藩, 1990, 朱显谟, 1993), 厚度不一, 一般 1~3 m, 最厚处可达 5~8 m, 通常是一类富含粘土质的土壤。早期的土壤学家把它们归为隐域土纲中的黑色石灰土和红色石灰土类(李连捷等, 1938, 侯学煜, 1940)。

贵州地区构造稳定, 岩层平缓, 风化持续时间较长, 形成了稳定巨厚的风化壳剖面。平坝剖面(26°24'N, 106°30'E)位于贵州中部乌江上游岩溶山地丘陵垄岗之上(图 1)。岩石剖面厚度大(总厚度 712 m), 基岩为产状平缓的早三叠世安顺组(T_{1a})非常纯净的白云岩, 酸不溶残留物约为 1%, 残留物

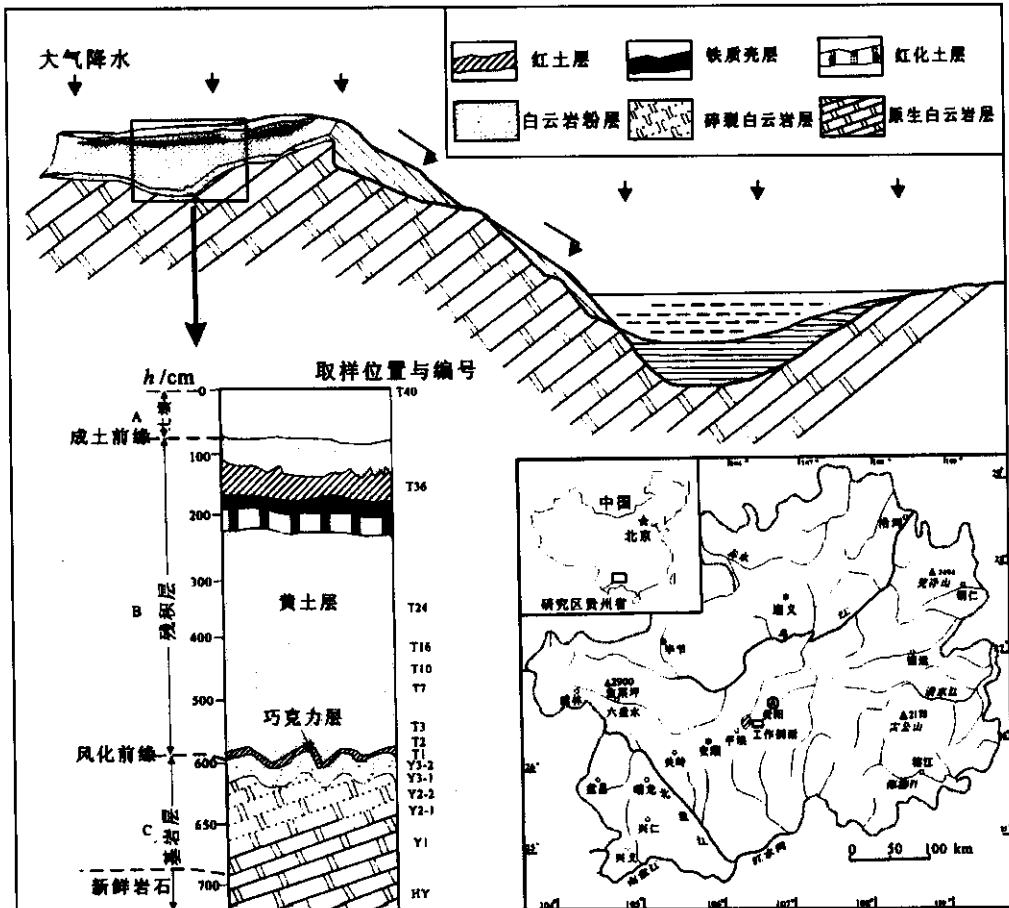


图 1 平坝白云岩风化剖面及剖面所处的位置示意图

Fig. 1 The simplified sketch of the Pingba profile showing the divided layers and sampling 右下图为贵州省略图并表示了剖面位置

的主要矿物组成为:伊利石(70.8%~73.3%),石英(8.2%~9.3%),斜长石(3.8%~5.4%),钾长石(4.4%~4.5%),黄铁矿(3.9%)和锐钛矿(2.7%~3.6%)等。风化剖面也较厚,剖面的主要矿物组合为粘土矿物+石英+长石+铁的矿物+锐钛矿。粘土矿物为伊利石+高岭石+三水铝石+蒙脱石+绿泥石和蛭石的混层矿物,仅在风化界面之上的B层样品T1中(巧克力层)出现了闪石类矿物(XRD谱图中出现明确的 $2\theta = 10.56$,即出现 $d = 8.3705$ 的峰,含量约占总矿物的8.8%)。其中最典型的平坝剖面可分出土壤层(A层,顶部为耕作层)、残积物层(B层),可分出红土层、铁质壳、弱红土层、黄土层、巧克力层(土层颜色似巧克力故名);风化基岩层(C层),可细分出岩粉层、碎裂岩层和原岩层和基岩层(R)。样品取自该天然剖面的人工探槽中(图1)。目前已通过碳酸盐岩中酸不溶物和剖面矿物成分的对比、稀土元素的配分模式、微量元素的比值和同位素特征等初步研究,论证了平坝剖面是就位风化剖面(王世杰等,1999; Ji等,2001)。

1.2 分析方法

自然风干后样品经缩分处理,用玛瑙研钵磨成小于200目的粉末样品。同时,白云岩中的“不溶

物”样品通过白云岩淋溶实验所获得(王世杰等,1999)。微量元素Nb的测定采用Teflon密闭溶样器溶样,等离子质谱法(ICP-MS)测定,测试过程均用标样(NBS-1633a和JB-1a等)进行监测,分析误差小于10%。

Sr和Nd采用同位素稀释法测定。分析采用酸溶样后,经标准的离子交换法收集Sr和Nd,在MAT-261固体质谱计分析。Sr同位素分别用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.37521$ 校正。重复分析的结果,在中国地质科学院同位素测试中心测定NBS987(SrCO_3)的平均值为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.71025 \pm 0.00002$ (2σ);在南京大学现代分析中心测定NBS987 Sr同位素标准的平均值为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710223 \pm 0.000008$ (2σ)。测试精度:Rb/Sr比值优于0.1%;Rb, Sr流程空白为 10^{-9} g至 10^{-10} g。

2 结果与讨论

平坝剖面中全岩样品的Sr同位素组成列于表1。在表1中从基岩到土壤层中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值从0.708到0.747,变化较大。其中以基岩C层白云岩的Sr同位素值变化小,为0.708~0.709;除风化界面之上的样品T1外,剖面B层样品的值都相对较

表1 平坝剖面全岩样品的Rb-Sr同位素及Nd, Nb的浓度测试结果

Table 1 Re-Sr isotopes Nd and Nb concentrations of bulk samples from the Pingba dolomite profile

样品号*	Rb/ $\times 10^{-6}$	Sr/ $\times 10^{-6}$	Nd/ $\times 10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$ **	Nb/ $\times 10^{-6}$ ***
T40	86.02	57.66	34.80	4.320	0.720657	15	35.22
T36	81.66	47.67	39.62	4.960	0.722417	15	24.53
T24	110.1	48.95	36.09	6.514	0.725022	10	28.56
T16	105.4	61.56	44.35	4.959	0.723188	18	29.15
T10	99.56	52.65	53.78	5.475	0.722024	13	26.99
T7	98.73	47.29	59.48	6.045	0.721828	19	27.45
T3	104.8	52.75	496.9	5.752	0.723320	22	25.00
T2	+ ^{d)}	+	1373	+	+	+	23.23
T2*	140.7	65.13	1412	6.626	0.726073	15	23.23
T1	+	+	6291	+	0.742276	22	27.45
T1(rpt)	123.8	53.06	6129	6.756	0.742615	12	27.45
Y3-2	+	+	43.354	+	0.708775	27	0.34
Y3-2(rpt)	2.646	54.40	43.248	0.1408	0.708461	13	0.34
Y2-2*	0.9136	64.75	8.563	0.03810	0.708466	17	0.18
Y2-2(rpt)	+	+	+	+	0.708453	15	0.18
Y2-1	0.9180	54.90	4.146	0.04842	0.708051	18	0.15
Y1	1.458	54.62	4.311	0.07729	0.708270	19	0.31
Y1(rpt)	1.177	53.35	4.280	0.06387	0.708006	18	0.31
YT1	200.3	70.04	25.501	8.283	0.747332	21	40.61

注: * 样号中标 * 者为在南京大学现代分析中心测定,其余样品均在中国地质科学院同位素测试中心分析; 样号中标 (rpt) 者为重复测试的结果; ** $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的测定误差; *** 元素 Nb 的浓度是在中国科学院地球化学研究所用 ICP-MS 分析; 中标有 + 为未分析。

均一,为 0.722~0.726;而样品 T1 的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值异常富集,为 0.743,与原岩(Y1)中“不溶物”样品 YT1 的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 同位素 0.747 较为接近;并且在剖面顶部 A 层样品中同位素的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.7207,比 B 层样品略低。上述剖面样品的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值要比该区潜在的物质来源之一现代沉积物或黄土明显要大,例如现今主要河流沉积物的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值约为 0.710~0.720(Goldstein, 1988),以及中国黄土的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值约为 0.714~0.719(Jahn 等, 2001)。在⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值与 Sr 浓度的倒数图解中,平坝剖面样品分别分布在几条与 Sr 浓度无明显相关的直线附近(图 2),与典型的硅酸盐风化剖面岩土样品常分布在一条直线上不尽相同。其中,由白云岩所组成的短虚线代表了白云岩自身的化学风化特征,因为白云岩中 Sr 主要分布于矿物的晶格中,少量分布于样品“不溶物”中,所以图中 1/Sr 的变化,主要反映白云岩中“不溶物”数量明显变化,并且此刻的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值变化很小;由白云岩中“不溶物”和紧挨岩土界面之上的土层样品 T1 构成的点虚线表明下伏的白云岩与上覆风化剖面之间具有明显的继承特征;其余由平坝剖面 and 土壤层样品所构成的实线,为类似于其它岩类典型的风化线。所以,平坝剖面样品的 Sr 同位素组成显示出该剖面为典型的白云岩就位风化剖面。

在化学风化过程中,就位风化剖面中 Sr 同位素的变化通常是与风化剖面中风化组分相对不活化元素所淋失的 Sr 息息相关的。例如,在已知花岗岩类的风化过程中,因为风化剖面中 Nb 是不活

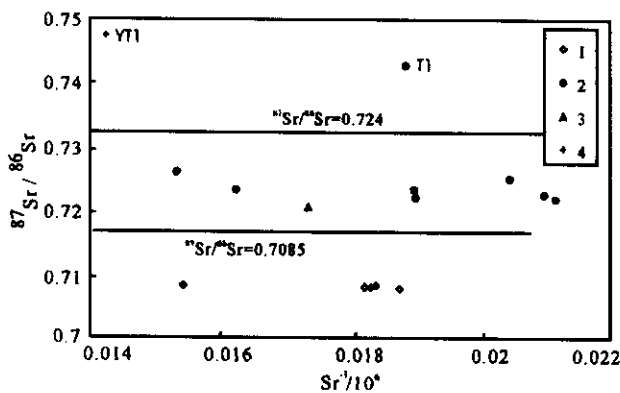


图 2 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值与 1/Sr 浓度图解

Fig.2 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios variation with 1/Sr concentration in the Pingba profile

1-白云岩样品 2-代表残积层样品 3-代表土壤层样品;
4-代表白云岩中“不溶物”的样品

化元素,而 Sr 却明显具有活化淋失特征,所以风化溶液中的 Nb/Sr 比值接近于零,从而⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与 Nb/Sr 比率的图解可用于来分辨活化的 Sr 端元,因此,它能很好地确定风化组分中 Sr 同位素的来源(Bullen 等,1997;White 等,2001)。从已有的贵州省碳酸盐岩风化剖面的研究中获知,风化剖面中元素 Nb 也是不活化元素(王世杰等,1999),是否可以利用⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与 Nb/Sr 的比率图解来限定碳酸盐岩风化组分的 Sr 来源呢?在图 3 中,平坝剖面的样品伴随着⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值增加,同时也出现了残积风化层向上 Nb/Sr 浓度线性增加的特征,类似于花岗岩类的化学风化层的 Sr 同位素演化特征(White 等,2001)。同时平坝剖面样品明显地展现出 2 个过程:①由白云岩与白云岩中的“不溶物”及 B 层下部样品 T1 和 T2 所构成的趋势线;②由残积物下部样品所构成的趋势线。前者与⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 轴的交切点为 0.7074(Nb/Sr=0),显示样品中不包含 Nb 元素,该点代表风化组分的端元(Bullen 等,1997),与三叠系纯净碳酸岩的 Sr 同位素组成非常接近(Burke 等,1982),已知白云岩中的“不溶物”是白云岩淋溶实验获得的,所以该趋势线很好地反映出白云岩的淋溶堆积特征;后者与⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 轴的交切点为 0.7398,可能与剖面中主要矿物如钾长石、伊利石、稀土等矿物的化学风化相关,是残积土再风化的一个过程,并可能代表着可交换 Sr 和矿物的非协同风化的结果(White 等,2001),但是从该图中还不能清楚地判断该过程中矿物组分的确切贡献。上述⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与 Nb/Sr 的比率图解既能很好地指示剖面化学风化的原矿物,又能很好地指示剖面的原位风化特点,并区分出了白云岩风化的两阶段性(王世杰等,1999)。所以,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与 Nb/Sr 比率的图解

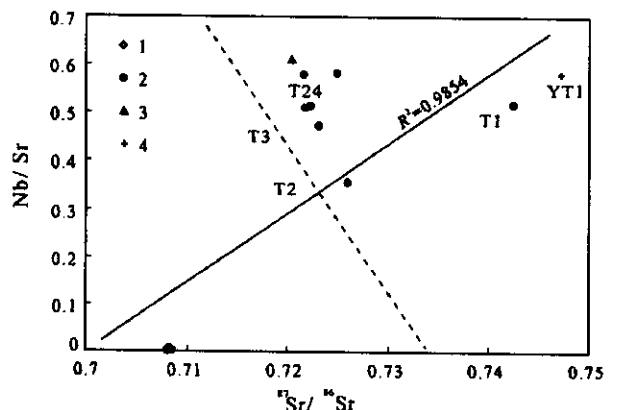


图 3 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值与 Nb/Sr 比率的图解

Fig.3 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr trend as functions of Nb/Sr ratios
图例见图 2

也能很好地适用于碳酸盐岩的化学风化过程的指示。

风化剖面中 REE 的活化分异主要受风化条件和稳定的原生含稀土矿物,特别是副矿物(磷灰石、榍石等)的制约(Braun 等,1998;Aubert 等,2001)。在化学风化过程中 Nd 将不会发生显著的分异(Borg 等,1996;Nesbitt 等,1997)。例如,在可溶相被溶解的风化过程中 Nd(或 REE)的溶解是滞后的,因为 Nb 不出现在可溶相中,或者虽从可溶相释放,但很快会成为另一矿物相沉淀而变得难溶(Martin 等,1999)。Rb 与风化剖面中 Sr 的地球化学行为明显不同,因为在风化环境 Sr 是易溶的,并且不能在许多次生矿物相中沉积,所以化学风化剖面中会出现 Sr 的淋失特征(Dasch, 1969)。综上所述,可以认为风化溶液中的 Nd/Sr 比值也接近于零。仿照图 3 的图解方式,可以建立 Nd/Sr 比值和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解模型(图 4)。在图 4 中,白云岩本身构成一条 Nd/Sr 比率增大,而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值略有升高的直线 I;紧挨风化前缘的几个样品 T1, T2 和 T3 构成一条 Nd/Sr 比值急剧减小,同时 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比率也骤然减小的直线 II($R^2 = 0.99$);而其余残积层样品却组成另一条线,为 Nd/Sr 比值减小和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比率升高的直线 III。其中,直线 I 与横坐标相交于 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7080$ (Nd/Sr = 0),与该剖面下伏白云岩原岩的 Sr 同位素比值是相同的,该线可能指示白云岩中包括“不溶物”中矿物优先风化或水岩相互作用过程的趋势线,因此该线反映出白云岩风化的第一阶段自身风化所经历的一些地球化学过程;直线 II 与横坐标相交于 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7219$,可能接近于一些稀土矿物的 Sr 同位素组成端元,并且 Nd 和 Sr 表现出接近化学计量的释放特征,所以直线 II 显然与风化过程中原生稀土矿物的大量淋失有直接关系,这个推测印证了该剖面下部层位样品中出现稀土矿物的电镜实验结果(王世杰等,2001),反映出风化组分中 Sr 同位素主要是由稀土元素矿物提供;直线 III 与横坐标相交于 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7251$,可能指示剖面中伊利石、钾长石等矿物的风化趋势,或可能为可交换 Sr 的变化,从该线上也显示 Nd 和 Sr 接近化学计量的释放,所以风化矿物的非协同式风化可能占主要的原因,但目前还缺乏具体分辨矿物的资料。所以, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 Nd/Sr 比率的图解对白云岩的化学风化具有明显的指示意义,并更好地补充和限定了 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 Nb/

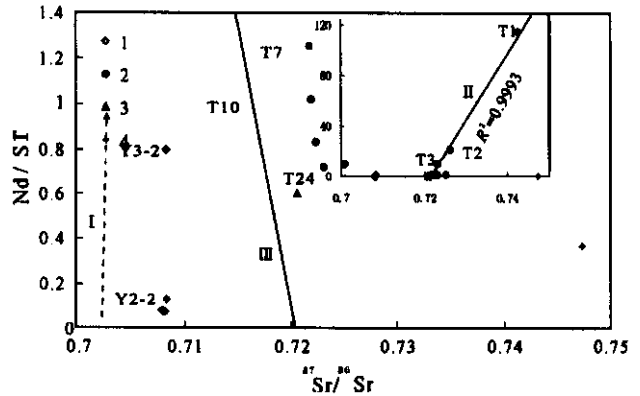


图 4 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值与 Nd/Sr 比率的图解

Fig. 4 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ trend as functions of Nd/Sr ratios
内插图为纵座标轴较大的范围,包括了所有样品,图例见图 2

Sr 比率的图解所反映出的矿物组分和风化过程。

3 结论及地质意义

通过对平坝白云岩剖面中 Sr 同位素组成的研究,揭示了典型的碳酸盐岩就位风化剖面的同位素特点。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 Nb/Sr 比率的图解显示,剖面下部由岩土界面向上的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 增大与白云石的溶解直接相关,而剖面上部可能代表着可交换 Sr 或矿物优先风化的过程,同时也印证了碳酸盐岩化学风化可分成两阶段的结论。鉴于在风化剖面中的 Nd 和 Sr 性质不同,笔者提出可通过 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 Nd/Sr 比率的图解来限定风化组分。其中,白云岩构成一条自身风化线,反映该过程中的一些地球化学作用;在风化剖面下部岩土界面之上的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 随层位的升高而降低,稀土矿物的风化在这个过程中占主要的地位。而风化剖面上部 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 随层位的升高而略显增大,推测可能是由于伊利石、钾长石等矿物非协同式风化的结果。

在风化剖面中 Sr 同位素演化都具有类似的特征,为难以界定的就位风化剖面找到一条重要的甄别指标。同时风化组分中的 Sr 释放是随风化剖面中矿物组成或可交换 Sr 的变化而变化,因此流域中水体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 也将会随时间变化而发生改变。所以在确定风化组分端元和利用河水运移的 Sr 同位素来反演基岩风化的历史和大陆古环境的演变时,应注意到时间这一重要参数的演变意义。当然关于风化剖面中 Sr 同位素的分异研究,还应注意一些其他因素,例如在一些温度较低的地区风化强度相对较低,一些物质中可以发生固态转换过程的反应,及主要的阳离子交换、扩

散、氧化还原(Mn, Fe)等。因此,为了更准确地限定风化组分的来源,还需要对该区化学风化环境下的土壤矿物学和土壤水化学进行更详细的研究。

参 考 文 献

- 陈骏,安芷生,汪永进等.1998.最近 800 ka 洛川黄土剖面中 Rb/Sr 分布和古季风变迁.中国科学(D 辑),27(6):498~504.
- 侯学煜著.1940.贵州中北部之土壤.土壤专报(20):1~40.
- 李春雷,陈骏,季峻峰.1990.青藏高原的隆起与海洋锶同位素组成的演化.地球科学进展,14(6):582~587.
- 李连捷,熊毅,侯学煜.1938.贵州中南部之土壤.土壤专报,18:1~52.
- 马英军,刘从强.2001.花岗岩化学风化过程中的 Sr 同位素演化-矿物相对风化速率的影响.中国科学(D 辑),31(8):634~640.
- 王世杰,季宏兵,欧阳自远等.1999.碳酸盐岩风化成土作用的初步研究.中国科学(D 辑),29(5):441~449.
- 王世杰,季宏兵,孙承兴.2001.贵州平坝县白云岩风化壳中稀土元素分布特征之初步研究.地质科学,36(4):474~480.
- 席承藩.1990.土壤是气候变化的长期记录者.土壤学报(1):82~89.
- 杨杰东,陈骏,李春雷.2000.2.5 Ma 以来大陆风化强度的演变.地质论评,46(5):472~480.
- 朱显谟.1993.中国南方的红土与红色风化壳.第四纪研究(1):75~84.
- Aubert D, Stille P, Probst A. 2001. REE fractionation during granite weathering and removal by waters and suspended loads: Sr and Nd isotopic evidence. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 65:387~406.
- Bailey S W, Hornbeck J W, Driscoll C T et al. 1996. Calcium inputs and transport in a base-poor forest ecosystem as interpreted by Sr isotopes. *Water Resour. Res.* 32:707~719.
- Blum J D, Erel Y. 1997. Rb-Sr isotope systematics of a granitic soil chronosequence: The importance of biotite weathering. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 61:3193~3204.
- Borg L E, Banner J L. 1996. Neodymium and strontium isotopic constraints on soil sources in Barbados, West Indies. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 60:4193~4206.
- Braun J J, Viers J, Dupre B et al. 1998. Solid/liquid REE fractionation in the lateritic system of Goyoum, East Cameroon: The implication for the present dynamics of the soil covers of the humid tropical regions. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 62:273~299.
- Bullen T D, White A F, Blum A E et al. 1997. Chemical weathering of a soil chronosequence on granitoid alluvium: II. Mineralogic and isotopic constraints on the behavior of strontium. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 61:291~306.
- Bullen T D, White A F, Huntington T G et al. 1999. A new approach for determining the $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratio of the "granitoid" weathering component. *Proceedings of Geochemistry of the Earth's surface*, A. A. Balkema, Rotterdam 369~372.
- Burke W H, Denison R E, Hetherington R B et al. 1982. Variation of seawater $^{87}Sr/^{86}Sr$ throughout Phanerozoic time. *Geology*, 10:516~519.
- Chen J, An Z, Head J. 1999. Variation of Rb/Sr ratios in the loess-paleosol sequences of Central China during the last 130,000 years and their implications for monsoon paleoclimatology. *Quat. Res.* 51:215~219.
- Clow D W, Mast M A, Bullen T D et al. 1997. $^{87}Sr/^{86}Sr$ as a tracer of mineral weathering reactions and calcium sources in an alpine/subalpine watershed, Loch Vale, Colorado. *Water Resour. Res.* 33:1335~1351.
- Dasch E J. 1969. Strontium isotopes in weathering profiles, deep-sea sediments, and sedimentary rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 33:1521~1552.
- Goldstein S L. 1988. Decoupled evolution of Nd and Sr isotopes in the continental crust and the mantle. *Nature* 336:733~738.
- Graustein W C. 1989. $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios measure the sources and flow of strontium in terrestrial ecosystems. In P. W. Rundel et al. eds., *Stable Isotopes in Ecological Research*. Springer-Verlag, 491~512.
- Innocent C, Michard A, Malengreau N et al. 1997. Sr isotopic evidence for ion-exchange buffering in tropical laterites from the Parana, Brazil. *Chemical Geology*, 136:219~232.
- Jahn Bor-ming, Gallet S, Han J. 2001. Geochemistry of the Xining, Xifeng and Jixian sections, loess plateau of China: edian dust provenance and paleosol evolution during the last 140 ka. *Chemical Geology*, 178:71~94.
- Ji Hongbing, Wang Shijie, Ouyang Ziyuan et al. 2001. The geochemistry of the front in weathering profiles of dolomite. In Cida R. ed. *Water-rock Interaction 2001*, Swets & Zeitinger, Lisse 403~406.
- Martin C E, McCulloch M T. 1999. Nd-Sr isotopic and trace element geochemistry of river sediments and soils in a fertilized catchment, New South Wales, Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 63:287~305.
- Miller E K, Blum J D, Friedland A J. 1993. Determination of soil exchangeable-cation loss and weathering ratios using strontium isotopes. *Nature* 362:438~441.
- Nesbitt H W, Markovics G. 1997. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles and petrogenesis of siliclastic sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 61:1653~1670.
- Palmer M R, Edmond J M. 1992. Controls over the strontium isotope composition of river water. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 56:2099~2111.
- Wadleigh M A, Veizer J, Brooks C. 1985. Strontium and its isotopes in Canadian rivers: fluxes and global implications. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 49:1727~1736.
- White A F, Bullen T D, Schulz M S et al. 2001. Differential ratios of feldspar weathering in granitic regoliths. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 65:847~869.