

# 喀斯特地区风化与成土过程特征:黄壤和石灰土剖面 Sr 同位素地球化学研究

刘文景<sup>1,3</sup>, 刘丛强<sup>1,2</sup>, 赵志琦<sup>2</sup>, 李龙波<sup>2,3</sup>, 涂成龙<sup>2</sup>, 刘涛泽<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 工程与水资源研究室, 北京 100029;  
2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;  
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**西南喀斯特山地土壤(主要有黄壤和石灰土)的母质来源和形成过程至今存在较多争议。本研究选择黔中地区喀斯特典型的黄壤和石灰土土壤剖面作为研究对象,以 Sr 同位素为主要研究手段探讨了喀斯特地区风化成土过程特征,不同土壤母质来源及不同类型土壤的相互成因关系。研究发现:石灰土与砂岩黄壤具有明显不同的 Zr/Nb 和 Th/Nb 比值;石灰土较砂岩黄壤具有高的 Rb/Sr 和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值;石灰土和砂岩黄壤的 Rb/Sr 与  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  相关关系不同。这些事实说明这两种类型土壤的成土母质来源不同,黔中高原广泛分布的红色风化壳来源物质可能与这两种土壤的成土母质有一定关系。另外,土壤剖面 Sr 同位素比值, Rb/Sr 含量比值变化说明,喀斯特山地土壤主要通过风化-搬运-堆积-再风化过程形成。

**关键词:**喀斯特地区;黄壤和石灰土;土壤 Sr 同位素;风化成土过程

**中图分类号:** P597 + 3    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-9901(2011)02-0331-06

## The weathering and soil formation process in karstic area, southwest China: A study on Strontium isotope geochemistry of yellow and limestone soil profiles

LIU Wen-jing<sup>1,3</sup>, LIU Cong-qiang<sup>1,2</sup>, ZHAO Zhi-qi<sup>2</sup>, LI Long-bo<sup>2,3</sup>, TU Cheng-long<sup>2</sup>, LIU Tao-ze<sup>2</sup>

(1. Laboratory of Engineering and Water Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. State Key laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The parent materials and formation processes of the soils distributing in the karst area (mainly yellow soil and limestone soil) of southwest China are still in dispute. The typical limestone and yellow soil profiles in the central Guizhou province are studied, using the strontium isotope as a main tool to discuss the soil weathering and formation process, origin of parent materials and relationship between the formation processes of different soils. The Th/Nb and Zr/Nb ratios of the limestone soil profiles differ from the yellow soil profiles. The limestone soil profiles show higher Rb/Sr and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios compared with the yellow soil profiles studied. The two kinds of soil profiles have different Rb/Sr versus  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  relationship. All the geochemical characteristics indicate a different origin of parent material, and that the parent materials of the red residua are likely derived from the same parent materials with one or two of the kinds of soils studied. The variations of strontium isotope and Rb/Sr content ratios suggest that the soils of the karst area are formed first by the weathering-transporting-depositing processes and then the in situ weathering.

**Key words:** karst area; yellow soil and limestone soil profiles; strontium isotope in soil; weathering and soil formation process

收稿日期: 2011-02-14

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目(41021062)

通讯作者: 刘丛强, E-mail: Liucongqiang@vip.skleg.cn

土壤由不同类型岩石在不同气候条件下风化并经过生物对成土母质的改造形成。各类地表岩石经过风化作用形成的土壤提供了它所承载的整个陆地生态系统所需的矿质营养元素,对元素的全球循环起着至关重要的作用。对土壤剖面相关地球化学特征的研究有助于我们理解岩石风化和成土过程中元素释放、迁移和循环规律及其控制机理,并有助于对生态系统演化中生态过程特征的理解。中国西南碳酸盐岩地区成土速率慢,土壤稀少,水土流失严重,导致喀斯特生态系统退化。对我国西南退化喀斯特生态系统的调控和恢复需要我们对生态系统岩石-土壤-植被界面养分生物地球化学循环充分了解,其中对喀斯特地区风化成土过程的研究尤其重要。

黄壤和石灰土是中国西南喀斯特地区广泛分布的两种主要土壤类型(刘世全和张明,1997)。对喀斯特地区大面积分布的黄壤和红色风化壳成因至今仍然存在较多争论,争论的焦点在于(1)碳酸盐岩地区分布面积和分布厚度较大的红色风化壳的成土母质是石灰岩、碎屑岩还是其他来源;(2)石灰土与黄壤和红壤之间是否存在成因联系;(3)该区广泛分布的碳酸盐岩和碎屑岩的风化成土过程特征如何。关于该区红色风化壳物质来源和成土过程问题,看法至今不一,主要存在四种观点(刘丛强,2009):(1)碳酸盐岩原地风化残积物堆积,形成过程包括碳酸盐岩溶蚀堆积和残积土再风化两个阶段(王世杰等,2002);(2)来自邻近或上覆碎屑岩的风化(卢耀如,1986;Olson et al,1980);(3)携带外

来成土物质的表生流体对碳酸盐岩的交代(李景阳等,1991;朱立军等,1996);(4)多成因观点,认为贵州岩溶台地红色风化壳物质来源同时有碳酸盐岩原地风化残积和碎屑岩风化来源(席承藩,1991;Dum et al,1999)。这些观点在一定程度上解释了特定地区或特定土壤剖面地球化学特征和成土过程,然而对于这两种土壤的物质来源、形成过程以及控制因素依然没有圆满的解释,甚至存在一些矛盾。至今相关研究主要针对西南喀斯特地区红色风化壳,开展了一系列化学和矿物学研究,对西南广泛分布的黄壤和石灰土的地球化学研究很少。本研究针对上述问题,对西南喀斯特地区广泛分布的自然黄壤和石灰土剖面开展了地球化学组成和 Sr 同位素组成变化研究,重点探讨土壤形成过程中,成土物质来源、矿物差异风化、土壤发育程度、外源 Sr 的混入等科学问题,为进一步理解喀斯特地区土壤形成及演化过程提供了更多的科学依据。

## 1 采样与分析方法

样品于2009年5月采自贵阳市乌当区百宜乡和清镇市王家寨两个区域。一共有五个采样点,即乌当区百宜乡的一个黄壤(BY-I)和一个黄色石灰土剖面(BY-II),以及清镇王家寨的两个黑色石灰土(QZ-I、QZ-II)和一个黄壤剖面(QZ-III),采样点基本情况见表1。黄壤的成土母岩主要为砂页岩,石灰土的成土母岩则为碳酸岩类,包括灰岩和白云岩。采样剖面深度都在110 cm以内,从下而上每5 cm采集一个样品。

表1 采样点基本情况

Table 1 Basic features of the soil profiles studied

| 剖面号    | 采样地区       | 土壤类型      | 经度      | 纬度     | 海拔(m) | 采样深度   | pH值范围     | 地形 |
|--------|------------|-----------|---------|--------|-------|--------|-----------|----|
| BY-I   | 乌当区<br>百宜乡 | 黄壤        | 107°01' | 26°47' | 1214  | 70 cm  | 4.03~4.80 | 中山 |
| BY-II  | 乌当区<br>百宜乡 | 黄色<br>石灰土 | 107°00' | 26°48' | 1327  | 75 cm  | 4.82~5.6  | 洼地 |
| QZ-I   | 清镇市<br>王家寨 | 黑色<br>石灰土 | 106°20' | 26°31' | 1285  | 65 cm  | 6.35~6.96 | 中山 |
| QZ-II  | 清镇市<br>王家寨 | 黑色<br>石灰土 | 106°20' | 26°31' | 1291  | 110 cm | 5.72~6.21 | 中山 |
| QZ-III | 清镇市<br>王家寨 | 黄壤        | 106°23' | 26°31' | 1279  | 70 cm  | 4.07~4.19 | 丘陵 |

样品pH值测定:无CO<sub>2</sub>水测土壤pH值法;微量元素测定:HNO<sub>3</sub>+HF混酸消解样品,以Rh为内标,测

试仪器为美国Perkin Elmer公司制造,型号为ELAN DRC-e的四级杆等离子体质谱(Q-ICP-MS),采用实验

室内参考物质 OU-6、AMH-1、GBPG-1 监控数据质量, 重复性测试相对标准误差小于 10%; Sr 同位素组成的测定: HNO<sub>3</sub> + HF 混酸消解样品, 经再生好的阳离子交换树脂 (AG-50W-X8) 柱分析纯化, 测试仪器为英国 Nu Instruments 公司生产的 Nu Plasma 型多接收等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS)。采用 NBS987 锶标准监测仪器

漂移, 测试期间 NBS987 的 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值为 0.710234 ± 0.000027 (2σ, n=45)。

## 2 结果

剖面土壤样品 Rb、Sr 等微量元素含量及 Sr 同位素比值数据见表 2。

表 2 黄壤和石灰土剖面土壤样品部分微量元素含量及 Sr 同位素组成 (含量单位: μg · g<sup>-1</sup>)

Table 2 The concentration data of trace elements and <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratio of the samples from the soil profiles studied

| sample     | Zr     | Nb    | Th    | Rb     | Sr    | <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr | sample        | Zr     | Nb    | Th    | Rb     | Sr    | <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr |
|------------|--------|-------|-------|--------|-------|------------------------------------|---------------|--------|-------|-------|--------|-------|------------------------------------|
| BY- I -1   | 238.00 | 33.60 | 6.66  | 19.30  | 56.70 | 0.71072                            | QZ- I -10     | 508.00 | 32.90 | 22.80 | 122.00 | 48.80 | 0.72026                            |
| BY- I -2   | 259.00 | 34.00 | 6.95  | 18.40  | 56.80 | 0.71063                            | QZ- I -11     | 425.00 | 30.00 | 22.60 | 129.00 | 47.10 | 0.72096                            |
| BY- I -3   | 261.00 | 34.20 | 6.90  | 17.80  | 54.40 | 0.71063                            | QZ- I -12     | 373.00 | 28.20 | 22.90 | 143.00 | 43.60 | 0.72224                            |
| BY- I -4   | 259.00 | 34.80 | 6.85  | 17.30  | 56.00 | 0.71056                            | QZ- I -13     | 340.00 | 24.80 | 22.10 | 146.00 | 40.60 | 0.72266                            |
| BY- I -5   | 258.00 | 35.80 | 7.16  | 17.40  | 57.20 | 0.71049                            | QZ- II -1     | 369.00 | 25.10 | 20.30 | 135.00 | 54.40 | 0.71847                            |
| BY- I -6   | 260.00 | 35.10 | 7.18  | 17.40  | 56.40 | 0.71050                            | QZ- II -2     | 382.12 | 27.14 | 23.26 | 129.78 | 51.86 | 0.71865                            |
| BY- I -7   | 236.00 | 32.90 | 6.96  | 17.80  | 58.60 | 0.71063                            | QZ- II -3     | 373.49 | 26.55 | 22.24 | 118.29 | 49.85 | 0.71842                            |
| BY- I -8   | 269.00 | 39.00 | 9.23  | 23.60  | 61.57 | 0.71104                            | QZ- II -4     | 404.36 | 28.48 | 24.01 | 119.51 | 49.14 | 0.71898                            |
| BY- I -9   | 280.00 | 36.80 | 8.97  | 28.70  | 57.70 | 0.71167                            | QZ- II -5     | 397.06 | 29.57 | 24.15 | 126.58 | 51.29 | 0.71937                            |
| BY- I -10  | 292.00 | 39.30 | 8.98  | 30.40  | 58.50 | 0.71171                            | QZ- II -6     | 366.54 | 28.18 | 23.23 | 131.02 | 49.87 | 0.71952                            |
| BY- I -11  | 295.00 | 41.80 | 12.10 | 44.50  | 57.30 | 0.71274                            | QZ- II -7     | 386.00 | 29.30 | 21.90 | 139.00 | 48.50 | 0.71957                            |
| BY- I -12  | 319.00 | 44.00 | 9.13  | 34.90  | 66.10 | 0.71202                            | QZ- II -8     | 368.00 | 28.60 | 22.10 | 148.00 | 49.10 | 0.72043                            |
| BY- I -13  | 319.00 | 38.70 | 10.60 | 45.60  | 56.70 | 0.71372                            | QZ- II -9     | 179.00 | 24.20 | 21.10 | 144.00 | 48.80 | 0.72030                            |
| BY- I -14  | 340.00 | 40.10 | 11.50 | 56.20  | 54.90 | 0.71518                            | QZ- II -10    | 346.00 | 27.20 | 23.10 | 157.00 | 49.00 | 0.72137                            |
| BY- II -1  | 231.78 | 16.91 | 10.25 | 48.54  | 36.83 | 0.71748                            | QZ- II -11    | 322.00 | 25.80 | 22.20 | 153.00 | 47.40 | 0.72089                            |
| BY- II -2  | 265.00 | 16.60 | 9.80  | 49.90  | 43.80 | 0.71808                            | QZ- II -12    | 149.00 | 22.60 | 22.10 | 157.00 | 48.80 | 0.72110                            |
| BY- II -3  | 258.90 | 18.46 | 11.36 | 52.90  | 39.22 | 0.71951                            | QZ- II -13    | 318.00 | 26.80 | 25.50 | 138.74 | 48.16 | 0.72085                            |
| BY- II -4  | 266.44 | 18.61 | 11.10 | 57.15  | 37.87 | 0.71925                            | QZ- II -14    | 166.00 | 24.40 | 21.30 | 148.00 | 45.40 | 0.72112                            |
| BY- II -5  | 271.77 | 18.80 | 11.83 | 59.94  | 38.31 | 0.71940                            | QZ- II -15    | 309.00 | 25.90 | 22.00 | 157.00 | 47.80 | 0.72131                            |
| BY- II -6  | 282.65 | 19.15 | 11.86 | 60.33  | 38.58 | 0.71934                            | QZ- II -16    | 352.00 | 25.70 | 22.00 | 158.00 | 53.60 | 0.72130                            |
| BY- II -7  | 269.97 | 18.77 | 11.97 | 62.68  | 38.22 | 0.71946                            | QZ- II -17    | 314.00 | 27.40 | 22.30 | 163.00 | 49.50 | 0.72135                            |
| BY- II -8  | 257.00 | 19.80 | 12.90 | 63.21  | 38.39 | 0.71929                            | QZ- III -1    | 412.00 | 62.60 | 13.10 | 54.43  | 80.42 | 0.71167                            |
| BY- II -9  | 249.38 | 19.01 | 12.46 | 64.01  | 36.68 | 0.71949                            | QZ- III -2    | 423.00 | 61.10 | 11.10 | 48.10  | 79.10 | 0.71116                            |
| BY- II -10 | 256.18 | 19.48 | 12.91 | 67.50  | 38.72 | 0.71962                            | QZ- III -3    | 404.00 | 57.20 | 11.10 | 47.50  | 77.00 | 0.71099                            |
| BY- II -11 | 252.91 | 19.44 | 12.78 | 66.63  | 39.06 | 0.71954                            | QZ- III -4    | 352.00 | 59.70 | 10.00 | 44.80  | 83.00 | 0.71087                            |
| BY- II -12 | 241.97 | 19.42 | 13.08 | 66.27  | 38.59 | 0.71970                            | QZ- III -5    | 363.00 | 58.60 | 10.50 | 48.60  | 92.80 | 0.71078                            |
| BY- II -13 | 245.88 | 19.79 | 13.37 | 66.40  | 39.34 | 0.71923                            | QZ- III -6    | 359.00 | 57.20 | 10.70 | 49.80  | 92.40 | 0.71091                            |
| BY- II -14 | 257.16 | 20.20 | 13.27 | 68.94  | 41.15 | 0.71976                            | QZ- III -7    | 330.00 | 56.10 | 11.10 | 50.60  | 89.70 | 0.71091                            |
| BY- II -15 | 221.00 | 18.70 | 11.30 | 61.80  | 41.70 | 0.71928                            | QZ- III -8    | 402.00 | 59.20 | 10.90 | 47.30  | 88.00 | 0.71099                            |
| QZ- I -1   | 466.00 | 29.50 | 16.60 | 121.00 | 59.60 | 0.71812                            | QZ- III -9    | 369.00 | 57.80 | 12.00 | 56.10  | 95.20 | 0.71122                            |
| QZ- I -2   | 496.00 | 32.90 | 18.60 | 128.00 | 60.00 | 0.71834                            | QZ- III -10   | 350.00 | 55.80 | 11.30 | 53.10  | 87.90 | 0.71148                            |
| QZ- I -3   | 187.00 | 29.50 | 18.00 | 124.00 | 54.80 | 0.71897                            | QZ- III -11   | 368.00 | 58.00 | 11.50 | 54.20  | 90.30 | 0.71136                            |
| QZ- I -4   | 537.00 | 34.30 | 18.90 | 133.00 | 57.50 | 0.71933                            | QZ- III -12   | 377.00 | 59.00 | 11.60 | 55.90  | 91.00 | 0.71129                            |
| QZ- I -5   | 509.00 | 33.00 | 18.90 | 123.00 | 53.30 | 0.71923                            | QZ- III -13   | 418.00 | 58.80 | 12.40 | 52.90  | 80.30 | 0.71172                            |
| QZ- I -6   | 448.00 | 32.60 | 21.60 | 129.26 | 48.50 | 0.71961                            | QZ- III -14   | 372.00 | 58.10 | 11.60 | 57.80  | 87.80 | 0.71173                            |
| QZ- I -7   | 538.00 | 35.70 | 20.10 | 125.00 | 54.90 | 0.71965                            | 百宜砂页岩<br>风化前缘 | 198    | 28.8  | 5.6   | 21.1   | 57.1  | 0.70943                            |
| QZ- I -8   | 600.00 | 37.00 | 21.20 | 123.00 | 56.70 | 0.71975                            | 清镇白云<br>质灰岩   | 0.925  | 0.127 | 0.043 | 0.103  | 232   | 0.70775                            |
| QZ- I -9   | 561.00 | 35.80 | 21.80 | 119.00 | 48.70 | 0.71966                            |               |        |       |       |        |       |                                    |

## 2.1 Rb - Sr 含量变化特征

所有研究土壤的 Rb/Sr 含量比值变化为 0.3 ~ 3.5, 其中砂岩黄壤剖面的 Rb/Sr 比值比石灰土剖面土壤明显偏低(图 1)。两个地区石灰土剖面土壤的 Rb/Sr 比值有所不同, 清镇王家寨的石灰土剖面具有较高的 Rb/Sr 比值, 而乌当区百宜乡的石灰土剖面该值相对较低。两个不同地区的砂岩黄壤的 Rb/Sr 比值却没有明显差别。

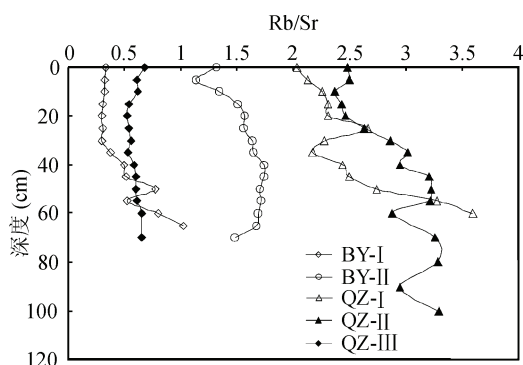


图 1 黔中石灰土和砂岩黄壤剖面土壤的 Rb/Sr 比值变化  
Fig. 1 Variations of soil Rb/Sr ratios in limestone soil and yellow soil profiles

总体上, 从土壤剖面上部至下部, Rb/Sr 比值有变大的趋势, 特别是在三个石灰土剖面上部较明显。乌当百宜乡砂岩黄壤剖面的下部土壤中, Rb/Sr 比值逐渐增大, 而清镇王家寨的砂岩黄壤剖面土壤的 Rb/Sr 比值几乎不变。

## 2.2 Sr 同位素地球化学特征

所研究的土壤  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值变化为 0.71049 ~ 0.72266。黄壤剖面多数样品的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值的大致范围为 0.71000 ~ 0.71200, 远小于石灰土剖面样品 0.71800 ~ 0.72100 的分布范围(图 2)。同属于石灰土的黄色石灰土和黑色石灰土相比, 在剖面深度约 40 cm 以上, 相同深度样品的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值相近, 向下则黄色石灰土  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值小于黑色石灰土。石灰土剖面 Sr 同位素比值从上至下逐步增大, 与 Rb/Sr 比值变化类似。两个砂岩黄壤剖面土壤的 Sr 同位素组成变化则有所不同, 剖面深度 30 cm 以上 Sr 同位素比值不变或有向上变大趋势, 向下则显示增大趋势。

## 3 讨论

### 3.1 成土物质来源

土壤或风化壳中 Zr、Hf、Nb、Ta、Ti 等元素被认为是在风化过程中地球化学行为不活泼的元素, 其

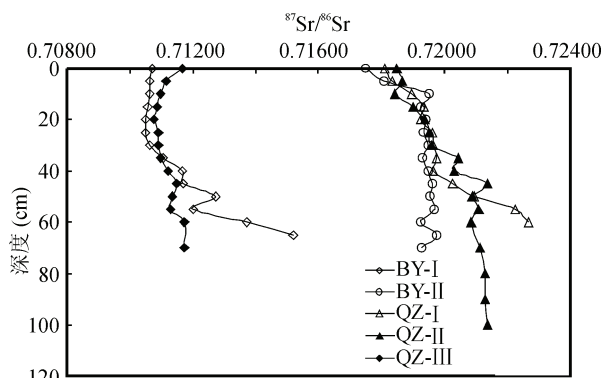


图 2 黄壤和石灰土剖面土壤样品的 Sr 同位素组成随深度变化特征

Fig. 2 Variations of soil  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios in the soil profiles studied

比值反映了成土母质的相应化学组成。图 3 表示所研究土壤的 Th/Nb 和 Zr/Nb 含量比值变化。如图 3 所示, 两种类型的土壤具有截然不同的 Th/Nb 和 Zr/Nb 比值: 石灰土较砂岩黄壤具有明显较高的 Th/Nb 和 Zr/Nb 比值。图 3 中贵阳市邻近地区碳酸盐岩之上的红色风化壳 Th/Nb 和 Zr/Nb 比值不同于石灰土和砂岩黄壤, 其相对石灰土具有较低的 Zr/Nb 比值。

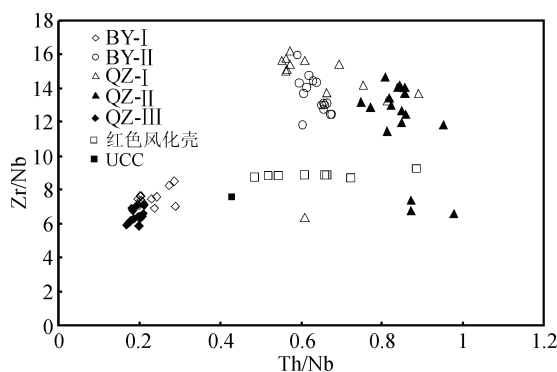


图 3 黄壤和石灰土剖面土壤样品的 Th/Nb 与 Zr/Nb 比值变化特征

(红色风化壳相关数据来自孙承兴等, 2002; UCC 相关数据来自 Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 3 Variations of soil Th/Nb versus Zr/Nb ratios in the soil profiles studied

(red weathering crust data from sun et al, 2002; UCC data from Taylor and McLennan, 1985)

土壤的 Sr 同位素组成变化取决于 4 个主要因素, 即成土母质的年代、成土母质的 Rb/Sr 比值、风化强度和风化壳形成的时代。图 2 表明两种类型土壤的 Sr 同位素比值差异明显。由于研究的石灰土

和砂岩黄壤所处区域的石灰岩和砂岩地层具有相近的地质年代:三叠纪和二叠纪,故其母岩形成时代不是造成土壤 Sr 同位素组成显著不同的主要因素。因此,土壤 Sr 同位素组成的变化主要反映了成土母质的来源差异。

图 4 表示了所研究黄壤和石灰土剖面土壤的 Rb/Sr 与  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值的相互变化关系。两个黄壤剖面 (BY-I 和 QZ-III) 的土壤样品具有较低的 Rb/Sr 和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值,黄色石灰土 (BY-II) 的 Rb/Sr 和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值中等,黑色石灰土剖面 (QZ-I 和 QZ-II) 的土壤样品具有较高的 Rb/Sr 和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值。各个研究剖面土壤样品的 Rb/Sr 与  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  呈现良好的线性相关,两个黄壤剖面和三个石灰土剖面土壤样品的相关关系各自具有相似的斜率,即“趋势线”各自相互平行,但具有不同的 Y 轴截距,即不同的初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值。黔中平坝红色风化壳剖面样品与本工作研究的土壤样品不同,具有较高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值,而 Rb/Sr 比值相似。

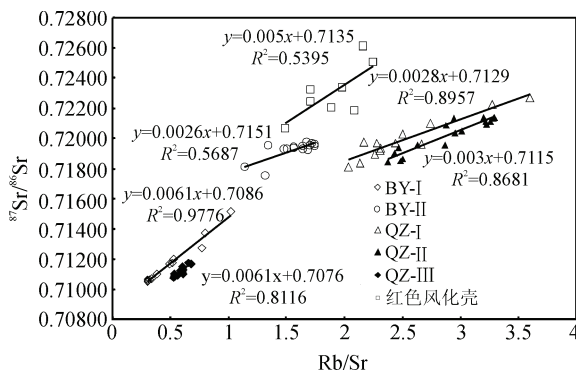


图 4 黄壤和石灰土剖面 Rb/Sr 和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值的变化关系 (红色风化壳相关数据来自季宏兵和王世杰,2008)

Fig. 4 The relationship between Rb/Sr and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios of the soil profiles studied (red weathering crust data from Ji and Wang, 2008)

含 Rb 矿物和含 Sr 矿物不仅有不同的风化速率,而且往往还具有不同的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值,因此风化壳物质的 Rb/Sr 和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  在某些情况下成正比关系。在图 4 中,同一剖面土壤样品大致分布在同一条趋势线上,说明同一剖面土壤的母质应该相同,具有相同的初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值。另外,图 4 中两个黄壤剖面的趋势线平行,同时三个石灰土剖面趋势线平行,表明相同土壤类型的土壤剖面母岩具有相同的矿物组成和相对比例,而黄壤和石灰土剖面母岩则具有不同的矿物组成。相同类型不同剖面的土壤

样品在 Rb/Sr -  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  图上出现趋势线的“平移”,主要是不同剖面母质的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值不同。

季宏兵和王世杰 (2008) 的研究得到云贵高原白云岩酸不溶物 Rb/Sr 比值为 2.86,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值为 0.74733。石灰土剖面 Rb/Sr -  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  关系趋势线截距 (初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值) 在 0.7115 ~ 0.7150, 远小于白云岩酸不溶物的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值。因此,对于喀斯特地区碳酸盐岩上广泛覆盖的红色风化壳是否是下伏基岩酸不溶物就地风化残余堆积的产物还需要进一步的探讨。

### 3.2 风化成土过程

刘丛强 (2009) 总结了我国西南喀斯特地区碳酸盐岩和碎屑岩的风化过程特征。石灰土的成土方式主要由两个阶段组成,首先是碳酸盐岩的溶蚀和其中硅酸盐碎屑的残留堆积,然后是硅酸盐碎屑残留堆积物的化学风化。碳酸盐岩风化的第二阶段,即溶蚀残留堆积物的化学风化实质上类似于硅酸盐碎屑岩的化学风化,在化学组成变化上存在富铝、富钾、脱钙和脱硅过程。根据地形地貌特点,刘丛强 (2009) 提出我国西南喀斯特山地石灰土的成土方式有两种,即位于高地的碳酸盐岩原位风化成土,一般位于坡面上原位侵蚀 - 风化成土,以及位于坡脚或山间洼地的堆积 - 风化成土。不同的成土方式形成的土壤在剖面上具有不同的矿物学和地球化学组成变化特征。

Rb 和 Sr 赋存于不同的造岩矿物:前者多赋存在含钾长石矿物而后者多赋存于含钙长石矿物中,含钾长石与含钙长石相比,具有较高的 Rb/Sr 比值和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值 (Faure, 1986; Blum and Erel, 1997; Bullen et al, 1997)。Rb, Ba 等元素易与 K 发生类质同像替换存在于富钾的长石中,而 Sr, Mn 等元素常与 Ca 发生类质同像替换,在含钙长石中较为富集。在相同的地表条件下,富 Rb 的矿物往往比富 Sr 矿物具有更强的抗化学风化能力 (Goldich and Gast, 1966)。因此,在整个岩石发生化学风化过程中,含钙长石较含钾长石更易发生化学风化, Sr 和 Ca 属于强烈迁移的元素,在母岩风化成土过程中易被淋失 (Nesbitt et al, 1980)。由此,风化物质的 Rb/Sr 和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值高低在某种程度上反映了风化程度:物质来源一定,风化程度高的物质具有较高的 Rb/Sr 和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值。图 1 和图 2 表明,所研究的大多数土壤剖面下部较上部具有较高的 Rb/Sr 和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值,这与一般典型的就地风化壳相应地球化学组成特征变化不同:典型的就地风化剖面由上

而下,随着风化程度的减弱,不同的长石矿物其风化程度不同,风化残余物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值呈现逐渐减小的趋势(Blum and Erel, 1995; Ma et al, 2010)。所研究的剖面深部土壤具有较高的 Rb/Sr 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,说明剖面下部土壤经历了较上部土壤更强的风化作用,导致含钙长石或其他富钙矿物的优先风化而致使风化残留物的 Rb/Sr 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值升高。上述事实说明,我国西南喀斯特地区石灰土甚至是部分砂岩黄壤主要是通过风化残余物搬运-堆积-再次化学风化过程形成的。

#### 4 结论

中国西南喀斯特地区以砂岩为基岩的黄壤和以石灰岩为基岩的石灰土剖面土壤具有明显不同的化学组成和 Sr 同位素组成特征;石灰土与砂岩黄壤具有明显不同的 Zr/Nb 和 Th/Nb 比值;石灰土较砂岩黄壤具有更高的 Rb/Sr 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值;石灰土和砂岩黄壤的 Rb/Sr 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  相关关系不同。这些事实说明这两种类型土壤的成土母质来源不同,黔中高原广泛分布的红色风化壳的来源物质可能与这两种土壤的成土母质有关。

土壤 Sr 同位素比值, Rb/Sr 含量比值从剖面上部至下部通常表现为升高趋势,这不同于岩石就地风化形成的风化壳的相应地球化学组成变化特征。这说明,喀斯特地区主要分布的这两种土壤类型主要为堆积风化形成,成土母质均经历了风化-搬运-堆积-二次风化并成土过程。

#### 参考文献

- 季宏兵,王世杰. 2008. 黔中白云岩风化剖面的铍、锶同位素组成及演化[J]. *自然科学进展*, 18(10): 1128-1135.
- 李景阳,王朝富,樊廷章. 1991. 试论碳酸盐岩风化壳与喀斯特成土作用[J]. *中国岩溶*, 10(1): 29-38.
- 刘丛强. 2009. 生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特土壤-植被系统生源要素循环[M]. 北京:科学出版社, 618.
- 刘世全,张明. 1997. 区域土壤地理[M]. 成都:四川大学出版社, 357.
- 卢耀如. 1986. 中国喀斯特地貌的演化模式[J]. *地理研究*, 5(4): 25-34.
- 孙承兴,王世杰,刘秀明,等. 2002. 碳酸盐岩风化壳岩-土界面地球化学特征及其形成过程——以贵州花溪灰岩风化壳剖面为例[J]. *矿物学报*, 22(2): 126-132.
- 王世杰,孙承兴,冯志刚,等. 2002. 发育完整的灰岩风化壳及其矿物学与地球化学特征[J]. *矿物学报*, 22(1): 19-29.
- 席承藩. 1991. 论华南红色风化壳[J]. *第四纪研究*, (1): 1-8.
- 朱立军,傅平秋,李景阳. 1996. 贵州碳酸盐岩红土中的粘土矿物及其形成机理[J]. *矿物学报*, 15(3): 290-297.
- Bullen T, White A, Blum A, et al. 1997. Chemical weathering of a soil chronosequence of granitoid alluvium: II Mineralogic and isotopic constraints on the behavior of strontium [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(2): 291-306.
- Blum J D, Erel Y. 1997. Rb-Sr systematics of a granitic soil chronosequence: The importance of biotite weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(15): 3193-3204.
- Blum J D, Erel Y. 1995. A silicate weathering mechanism linking increases in marine Sr-87/Sr-86 with global glaciation [J]. *Nature*, 373(6513): 415-418.
- Durn G, Ottner F, Slovenec D. 1999. Mineralogical and geochemical indicators of the polygenetic nature of terra rossa in Istra, Croatia [J]. *Geoderma*, 91: 125-150.
- Faure G. 1986. Principles of Isotope Geology [M]. 2<sup>nd</sup> ed. New York: John Wiley & Son, 117-199.
- Goldich S S, Gast P W. 1966. Effects of weathering on the Rb-Sr and K-Ar ages of biotite from the Morton Gneiss, Minnesota [J]. *Earth Planetary Science Letters*, 1(6): 372-375.
- Ma J, Wei G, Xu Y, et al. 2010. Variations of Sr-Nd-Hf isotopic systematics in basalt during intensive weathering [J]. *Chemical Geology*, 269(3-4): 376-385.
- Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. 1980. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(11): 1659-1666.
- Olson C G, Ruhe R V, Mausbach M J. 1980. The terra rossa limestone contact phenomena in Karst, Southern Indiana [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 44: 1075-1079.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The Continental Crust: Its composition and Evolution [M]. Oxford: Blackwell.