

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.183

引用格式: 黄燕鹏, 刘建宇, 张策, 等. 贵州石漠化区基岩风化地球化学过程及生态地质效应[J]. 中国地质调查, 2024, 11(4): 62–71. (Huang Y P, Liu J Y, Zhang C, et al. Geochemical process and ecogeological effects of bedrock weathering in the rocky desertification area of Guizhou Province[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(4): 62–71.)

# 贵州石漠化区基岩风化地球化学过程及生态地质效应

黄燕鹏<sup>1</sup>, 刘建宇<sup>2\*</sup>, 张策<sup>1</sup>, 揭文辉<sup>1</sup>, 亢益华<sup>3</sup>

(1. 核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050002; 2. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083;

3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘要:** 我国西南喀斯特区石漠化分布广泛, 其中贵州省石漠化发育尤为严重, 对当地生态环境安全造成了严重威胁。为阐明基岩风化成土过程与石漠化发育程度之间的内在关系, 对贵州省石漠化地区不同程度石漠化剖面的主微量元素含量及迁移演化规律、矿物组成特征、风化成土能力等因素进行了综合分析研究。结果表明: 石漠化地区成土物质是碳酸盐岩中易溶物质溶蚀及酸不溶物质在原地不断残积的结果; 不同程度石漠化剖面均处于高等风化程度, 剖面矿物风化趋势也呈现出石漠化程度越高, 土壤层风化程度越高的现象; 石漠化的发育与基岩风化成土过程中元素的迁移方式密切相关, 碳酸盐岩基岩中易溶元素含量越高, 基岩风化产生的残余成土物质越少, 石漠化发育程度越高。通过分析石漠化区的基岩风化地球化学过程及生态地质效应, 可以为石漠化成因机理的研究提供参考, 对于石漠化治理、促进区域经济可持续发展也具有重要意义。

**关键词:** 生态地质; 基岩风化; 地球化学; 石漠化; 碳酸盐岩

**中图分类号:** P512; P642.25; X142 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095–8706(2024)04–0062–10

## 0 引言

由于碳酸盐岩中的坚硬致密可溶性组分高, 在雨量充沛且降水集中的条件下易于溶蚀并被水带走, 不溶性的残留物少, 成土条件极差, 再叠加不合理垦荒等人类活动极易导致石漠化现象的发生<sup>[1–2]</sup>, 给生态环境及社会发展带来巨大的危害<sup>[3]</sup>。据2021年第四次石漠化调查数据<sup>[4]</sup>, 贵州省石漠化面积为151.1万 $\text{hm}^2$ , 石漠化极为发育, 严重威胁当地的生态环境安全。

长期以来, 国内外学者对石漠化的空间分布、形成机理及治理方式进行了丰富的研究, 取得了一系列有价值的成果。刘琦等<sup>[5]</sup>通过对碳酸盐岩物理化学特性对石漠化成因的影响进行研究, 认为碳

酸盐岩的CaO和MgO含量、表面粗糙程度、晶粒大小及内部孔隙结构等都与其溶蚀量和风化成土速度相关; 章明奎等<sup>[6]</sup>认为碳酸盐岩形成土壤的土体厚度和土壤质地主要受碳酸盐岩产状、岩性与分布区地貌等的影响, 且灰岩相对于白云岩形成的土壤土体更浅薄; 孙承兴等<sup>[7]</sup>认为碳酸盐岩由于显著的差异性风化使基岩面强烈起伏, 形成大量岩溶洼地、裂隙、地下管道、洞穴系统, 土壤在重力和水的作用下经过短距离被搬运到低洼地带或地下空间, 导致土壤流失, 这是形成石漠化最主要的地质因素。在碳酸盐岩风化成土过程中, 碳酸盐岩由于酸不溶物质含量低, 在遭受化学溶蚀作用后, 残留在原地的成土物质极少, 成土速度极为缓慢。同时由于碳酸盐岩化学溶蚀速度快, 导致其在风化成土过程中常常伴随着巨大的体积缩小, 原岩结构和成

收稿日期: 2023–05–07; 修订日期: 2024–07–09。

基金项目: 中国地质调查局“生态地质调查工程(编号: 0703)”和“全国地球关键带遥感地质调查(编号: DD20190536)”项目联合资助。

第一作者简介: 黄燕鹏(1996—), 男, 助理工程师, 主要从事生态地质方面的研究工作。Email: hyp7890@163.com。

通信作者简介: 刘建宇(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事生态地质和遥感地质方面的研究工作。Email: liujy5577@163.com。

土母质层无法保留,风化前锋(岩—土界面)表现为突变的接触关系<sup>[8]</sup>,从而无法利用其探索基岩上覆土壤层成土物质的来源,这也阻碍了对石漠化区基岩风化成土过程的研究。

以往工作对于喀斯特地区石漠化的科学内涵及成因机制虽有较丰富的研究,但很少关注石漠化地区基岩及其上覆土壤层的元素地球化学行为、粒度分布特征、风化程度等因素与不同程度石漠化成因之间的关系,为进一步加强对于石漠化地区基岩及其上覆土壤层元素的地球化学行为与不同程度石漠化成因之间关系的认识,选取贵州省西部、南部及中北部区域的不同程度石漠化剖面,对其基岩风化地球化学过程进行研究,探究在基岩风化过程中元素地球化学行为的差异对石漠化发育的制约与影响,为石漠化形成机理的研究及科学治理提供理论依据。

## 1 研究区概况

贵州省处于我国西南喀斯特区的核心部位,属于中国西部高原山地的一部分(图1),整体地势西高东低,自中部向北、东、南3面倾斜,全境海拔高度平均在1 000 m以上<sup>[9]</sup>。因受到大气环流、地形等因素的影响,省内地域温差较大,气候属于亚热带湿润季风气候<sup>[10]</sup>,表现为南北温差大,雨量充沛,雨热同期<sup>[11]</sup>。

贵州省整体由上扬子陆块与江南复合造山带组成<sup>[12]</sup>,区域岩石类型以灰岩及白云岩等碳酸盐岩,砂岩、泥岩及黏土岩等碎屑岩为主<sup>[13-14]</sup>,碳酸盐岩分布广泛,除东部区域以外全省几乎都有分布。

贵州省土壤类型以红壤、黄壤、黄棕壤、石灰土、紫色土、水稻土为主<sup>[15]</sup>。贵州省中北部和北部地区的植被是中亚热带常绿阔叶林,西南部地区则为常绿阔叶林及沟谷季雨林,中东部和东部地区为湿润性常绿阔叶林,西部地区则为半湿润常绿阔叶林<sup>[16]</sup>。

贵州地区雨热同季且多暴雨,为石漠化的形成提供了强大的侵蚀动力和适宜的岩溶条件。广泛发育的碳酸盐岩坚硬致密、水岩作用强烈,导致岩溶石山地貌陡峻、破碎,为水土流失提供了动能潜力,贵州省独特的生态地质环境为石漠化的发育提供了物质基础<sup>[17]</sup>。

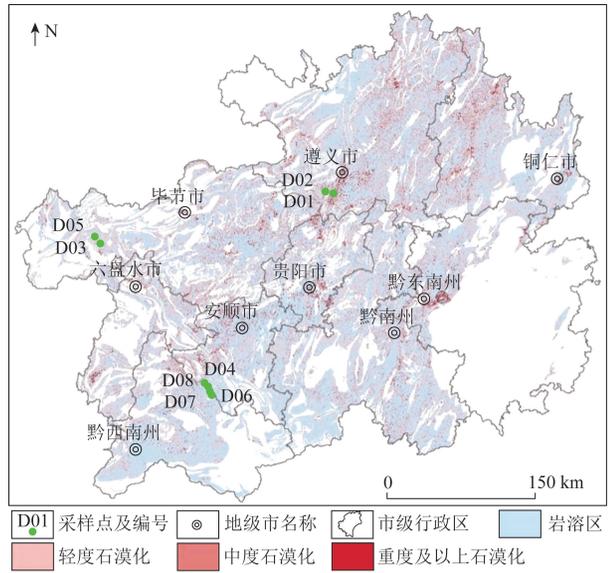


图1 研究区采样点分布

Fig.1 Sampling points distribution in the study area

## 2 样品采集与测试方法

### 2.1 样品采集

为了探究贵州喀斯特石漠化发育的生态地质条件,在贵州省内选择了8条不同岩性、不同分布位置的岩石剖面,采样点信息见表1,采样位置见图1。

表1 采样点基本信息

Tab.1 Basic information of the sampling points

剖面点号	岩性	高程/m	石漠化程度	地表植被
D01	粉泥晶灰岩	917	轻度	乔木、灌木、草地
D02	细晶灰岩	827	中度	乔木、灌木、草地
D03	亮晶生屑灰岩	2 485	中度	灌木、草地
D04	灰白色粉晶白云岩	822	中度	灌木、草地
D05	亮晶生屑灰岩	2 315	重度	灌木、草地
D06	灰色含生物碎屑微晶灰岩	1 222	重度	灌木、草地
D07	浅灰色微晶灰岩	548	极重度	草地
D08	灰色粉晶—微晶灰岩	1 101	极重度	草地

### 2.2 野外采样方法

对采样地区石漠化发育程度进行分级,分级标准主要参考基岩裸露率、地表植被覆盖度、土壤层厚度等指标<sup>[18]</sup>。不同石漠化程度景观及剖面特征如图2所示。根据基岩的风化程度,将剖面从上向下依次分为土壤层、风化层和基岩层,由于碳酸盐岩强烈的化学风化作用,导致大部分剖面为基岩—土壤二元结构,缺失风化层<sup>[19]</sup>。石漠化地区土壤

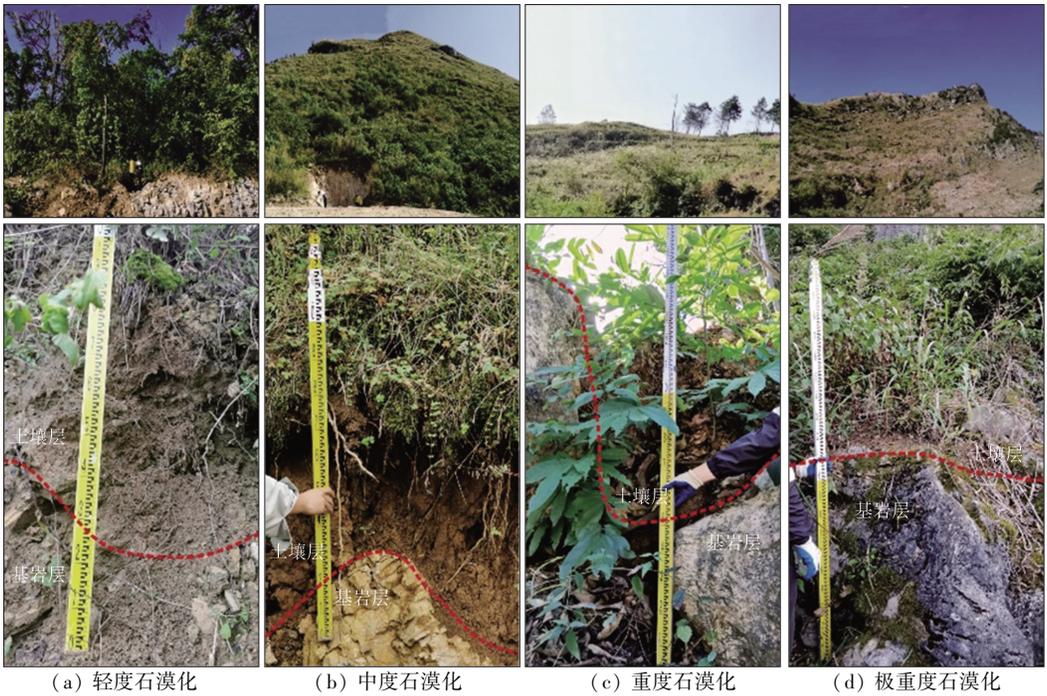


图2 不同程度石漠化景观及剖面特征

Fig. 2 Landscape and characteristics for rocky desertification sections with different degree

层的厚度较薄,为避免外来污染,本文采集的土壤层样品为该层中部土壤,均沿同一深度采集3件子样品,等重量混合为1件测试样品,每件测试样品重量不少于1 kg。风化层样品同样采自土壤层中部,根据风化层厚度,沿纵向以15~30 cm 间隔采集3~5件子样品,同重量混合为1件测试样品。采集的岩石层样品为该采样点底部出露的新鲜母岩样品,采集2~3块基岩样品组合为1件测试样品,采样次序自下而上。

### 2.3 测试方法

本文共选取8条不同程度石漠化剖面进行采样,对采集的样品进行元素分析测试、X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)测试、粒度分析测试,探索基岩风化成土过程的差异对石漠化发育的影响机制。样品主量元素分析采用X射线荧光光谱仪(Shimadzu XRF-1800)进行测定,测试结果相对偏差值小于1%,检测限为1%。样品微量元素含量的测定采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS),仪器型号为Agilent 7500a。样品粒度分析测试采用Mastersize 2000激光粒度仪,进样器型号为Hydro 2000MU(A),粒径的测试范围为20~20 000 μm。利用X射线衍射仪对样品进行矿物衍射分析,分析其衍射图谱,再结合主量元素测试结果确定样品的矿物组成。实验条件为:约200

目的干燥去水试样,管电压40 KV,管电流30 mA,扫描范围5°~80°,衍射宽度6°(2θ)。实验取得的XRD数据采用jade 6.0软件进行分析。

## 3 测试结果

### 3.1 剖面土壤层物质来源

在化学溶蚀过程中,由于高场强元素的化学性质较为稳定,不易在基岩风化过程中发生迁移,主要存在于基岩风化形成的残积物中,因此可以根据这类元素之间的比值进行物源示踪<sup>[20]</sup>。其中Zr元素主要赋存于锆石中,而锆石作为硅酸盐矿物稳定性极强,在碳酸盐岩化学风化成土过程中不易受到化学风化作用的影响<sup>[21]</sup>,Ti元素主要赋存于抗风化能力较强的矿物中,也不易发生迁移,因而不受元素化学风化作用的影响,因此Zr元素和Ti元素在风化过程中是相对稳定的,Zr/Ti值可以作为物源示踪的指标<sup>[22-23]</sup>。从各剖面的Zr/Ti值(表2)来看,基岩和其上覆土壤层之间差异不大,这说明各剖面基岩在风化成土过程中没有受到外来物质的显著迁入,其上覆土壤层是碳酸盐岩易溶物质溶蚀及酸不溶物质长期原地积累的结果。

不同程度石漠化剖面稳定元素协和图如图3所

表2 不同程度石漠化剖面主量元素含量及化学蚀变指数

Tab.2 Main element content and chemical alteration index for rocky desertification sections with different degrees

样号	$\omega_B/\%$							易溶组分/ 难溶组分	黏粒/ 粉粒+砂粒	Zr/Ti	$\omega(\text{Th})/10^{-6}$	CIA/%
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O					
D01-1	53.88	15.58	1.12	10.58	3.69	2.40	0.08	—	0.39	0.02	14.98	78.57
D01-2	54.77	14.38	1.82	9.98	3.34	2.09	0.09	—	—	0.02	13.80	78.63
D01-3	55.47	14.22	0.67	10.64	3.78	2.20	0.11	—	—	0.02	13.38	76.14
D01-4	53.97	16.65	0.58	10.75	4.13	1.63	0.10	—	—	0.02	18.10	77.62
D01-5	57.42	14.10	0.51	10.37	3.48	1.76	0.06	—	—	0.02	15.41	78.11
D01-6	51.96	17.42	0.81	11.22	3.90	2.09	0.11	—	—	0.02	16.77	79.20
D01-7R	7.40	4.49	45.87	1.07	0.67	1.82	0.05	3.74	—	0.02	1.80	83.35
D02-1	57.50	10.46	9.07	6.19	1.64	1.66	0.06	—	0.17	0.06	12.36	84.04
D02-2	58.91	11.04	7.95	6.37	1.72	1.62	0.06	—	0.29	0.05	13.72	84.41
D02-3	7.57	4.97	44.96	1.56	0.32	0.56	0.05	—	—	0.03	3.02	90.50
D02-4R	2.93	3.52	49.58	0.54	0.20	0.80	0.05	7.24	—	0.05	1.04	90.06
D03-1	54.63	17.44	1.24	8.33	1.84	1.43	0.16	—	0.16	0.04	23.42	87.37
D03-2	54.89	17.37	0.90	8.79	1.99	1.38	0.11	—	0.15	0.05	20.96	87.41
D03-3	55.54	17.75	0.58	9.25	2.21	1.42	0.11	—	—	0.05	23.91	86.52
D03-4R	2.66	3.51	50.72	0.40	0.12	0.60	0.08	7.84	—	0.07	0.93	89.58
D04-1	20.70	19.40	12.75	5.37	0.62	9.18	0.11	—	0.16	0.05	15.04	95.02
D04-2	6.75	8.53	23.30	1.45	0.27	18.06	0.10	—	—	0.04	3.82	93.25
D04-3R	0.50	3.59	31.34	0.18	0.03	21.02	0.09	12.29	—	0.08	0.70	91.87
D05-1	49.26	21.54	0.70	9.92	1.48	1.11	0.05	—	0.34	0.05	29.30	92.40
D05-2	46.40	24.27	0.81	10.62	1.44	1.14	0.06	—	—	0.04	31.56	93.25
D05-3R	1.59	3.34	52.26	0.32	0.05	0.36	0.05	10.05	—	0.04	0.78	93.39
D06-1	63.52	14.97	1.50	5.75	1.22	1.32	0.10	—	0.37	0.03	17.55	90.08
D06-2	62.50	16.01	1.50	6.08	1.27	1.37	0.12	—	0.44	0.03	17.66	90.11
D06-3R	2.68	3.45	53.14	0.29	0.09	1.80	0.07	8.59	—	0.08	0.54	91.34
D07-1	46.78	20.24	3.10	10.18	0.94	1.31	0.13	—	0.51	0.03	24.03	93.26
D07-2R	1.52	3.18	54.59	0.15	0.05	0.52	0.09	11.41	—	0.10	0.54	90.31
D08-1	44.16	23.43	1.66	9.07	0.67	1.54	0.09	—	0.33	0.04	25.81	95.78
D08-2R	0.44	3.15	55.18	0.07	0.03	0.66	0.08	15.30	—	0.24	0.55	91.54

注: 样号最后一位是字母 R 的为基岩样品, “—”为无数据。

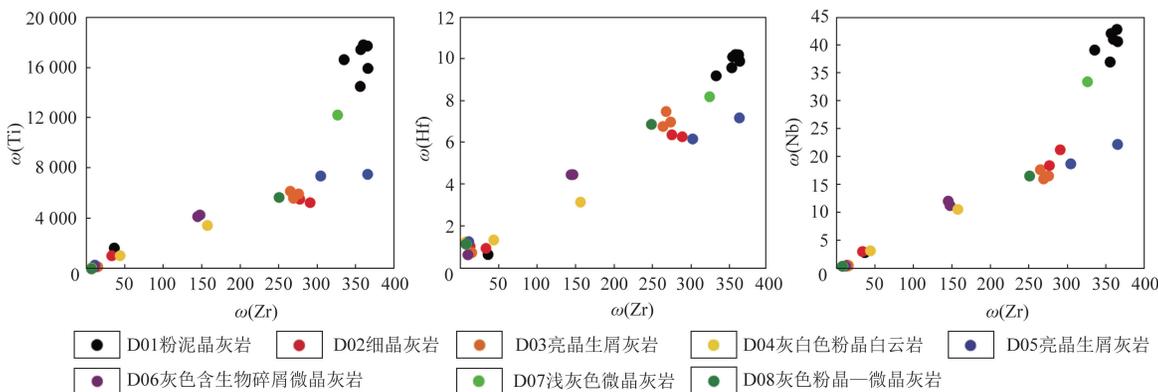


图3 不同程度石漠化剖面稳定元素协和图

Fig.3 Plot diagrams of the stable elements in different rocky desertification sections with different degrees

示,投图结果表明研究区石漠化区基岩上覆风化壳没有共同的物质来源,碳酸盐岩上覆土壤层是碳酸盐岩中易溶物质溶蚀及酸不溶物质长期积累所导致的结果。因此可以认为剖面成土母岩的风化速

率、成土量与石漠化发育程度关系密切。

### 3.2 主量元素特征

基岩风化成土的地质过程实质上是各种元素进行重新组合与迁移,不同特征的岩石因其所含矿

物种类与元素组成的不同,经过化学溶蚀后形成的土壤在组分、厚度、结构等方面存在差异,进一步影响着石漠化的形成及演化。碳酸盐岩的风化过程分为明显的两个阶段:第一阶段为基岩中酸不溶物质在风化过程中逐渐堆积形成残积土;第二阶段为残积土继续风化形成土壤<sup>[24-25]</sup>。岩石中 Ca、Mg、Na、K 等主量元素活动性强,在化学风化中转化为可溶性离子大量淋失, Si、Al、Fe 等主量元素性质相对稳定,风化后残留在原地,成为成土物质的主要来源。

由表 2 可知,不同程度石漠化剖面基岩中 Ca、Mg、Na、K 等易溶元素含量总和均高于 48.41%, Si、Al、Fe 等难溶元素含量总和低于 12.95%。从基岩到岩—土界面,元素含量发生了显著的变化,组成碳酸盐岩的主要成分 Ca、Mg 等元素形成的重碳酸钙、重碳酸镁随水流失,极难残留在原地,而难溶元素含量在岩—土界面上增加了 6 倍以上(如 D01-6 和 D01-7R),这在非碳酸盐岩地区中是不可能发生的,显示了碳酸盐岩化学风化成土独有的地球化学特征。在这样的生态地质背景下形成的土壤层浅薄,土体不连续,往往发育石漠化。

### 3.3 风化特征

化学蚀变指数 CIA 是判断化学风化程度的重要指标<sup>[26-27]</sup>,但只适用于同一风化剖面不同层位之间的对比分析。 $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO^*)] \times 100\%$ ,  $CaO^*$  为硅酸盐中的 CaO 含量,即计算中需要去除碳酸盐中的 CaO 和磷酸盐中的 CaO。一般来说,从土壤和沉积物中准确分离和提纯硅酸盐矿物是非常困难的,本文采用 McLennan<sup>[28]</sup> 提出的方法来修正 CaO 的含量:若土壤或沉积物样品中 CaO 的摩尔数小于 Na<sub>2</sub>O 的摩尔数,则  $CaO^* = CaO$ ;若土壤或沉积物样品中 CaO 的摩尔数大于 Na<sub>2</sub>O 的摩尔数,则  $CaO^* = Na_2O$ <sup>[27,29]</sup>。

如表 2 所示,除 D01 剖面外,其余剖面的 CIA 指数基本大于 85%,表明研究区不同程度石漠化风化剖面整体处于高等风化程度<sup>[30-31]</sup>。通常情况下,随着风化作用的进行,剖面从基岩层到土壤表层的 CIA 值应逐渐增大,但剖面中出现了表层土壤层 CIA 小于下部土壤层及基岩层的现象,这可能是石漠化地区表层细粒土壤在淋滤作用下向下渗透,在土壤层

下部逐渐累积所致。D02 和 D06 剖面土壤层的黏粒/(粉粒+砂粒)值也显示出表层土壤黏粒相对含量要低于下部土壤层,这可能是由于在雨水和重力的作用下,表层黏粒受到淋溶作用后容易沿粒间孔隙向下迁移而淀积。

通常情况下,随着石漠化的加剧,剖面土壤层黏粒含量减少,粉砂粒含量增加,即土壤会发生粗骨化<sup>[32]</sup>,但本文发现在不同程度石漠化剖面中,土壤层砂粒相对含量随石漠化程度的提高而呈现出先增大后减小的趋势(图 4)。一方面,这可能是由于石漠化越严重,岩石裸露率越高,在雨水作用下,松散且不易黏结的砂粒容易随水流失,而胶结性强的黏粒流失量小,导致其相对含量增加;另一方面,裸露的岩石会拦截从上部搬运来的土壤细颗粒,并堆积在石缝、溶沟和石坑等负地形中,难以随地表径流发生再次侵蚀。在重度和极重度石漠化地区地形破碎,连续性分布的土壤层被岩石分割成块状,岩多土少,土壤层厚度不均匀,土壤层分布不连续,从而导致土壤黏粒相对含量从中度石漠化到极重度石漠化增加,砂粒相对含量减少。

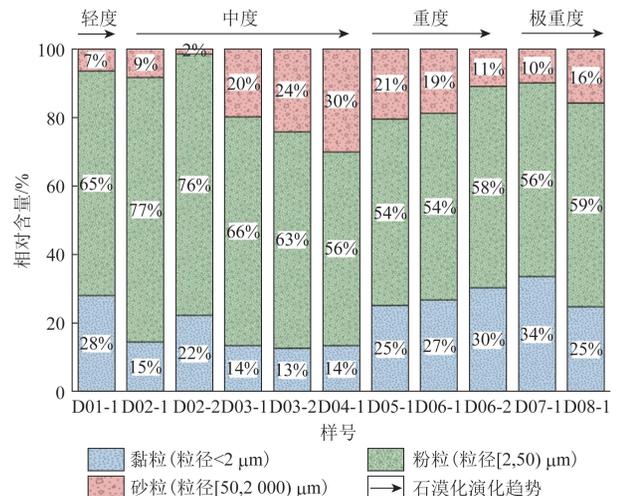


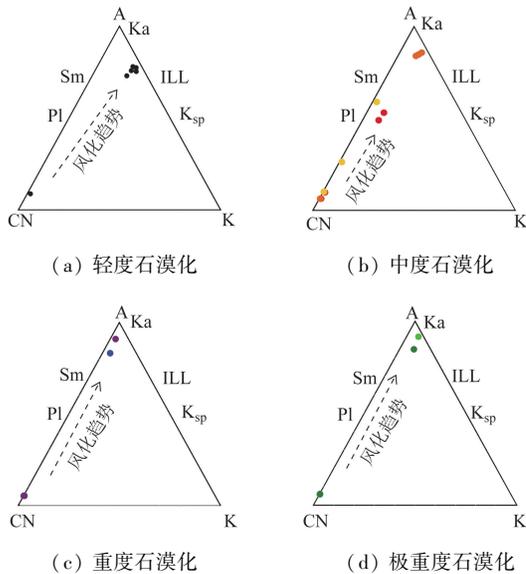
图 4 不同程度石漠化剖面土壤颗粒粒度分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of soil particles in rocky desertification sections with different degrees

### 3.4 矿物风化趋势

A - CN - K 三角图解不仅可以反映岩石风化成土过程中矿物组成的变化,还可以反映其化学风化趋势。其中不同程度石漠化剖面 A - CN - K 三角

图解见图 5,不同程度石漠化剖面的风化趋势均体现了碳酸盐岩中易溶矿物的快速淋失和难溶矿物的相对富集过程,这不同于一般结晶岩类缓慢的化学风化过程。化学风化的趋势指向大致与 A - CN 连线平行并指向 A 点,反映出方解石和斜长石抗风化能力较弱,强烈的化学溶蚀作用使 Ca、Na 显著淋失,斜长石因其架构稳定性较差最先发生风化,而钾长石较稳定,K 元素淋失相对较慢,且 Al 元素伴随着风化的进行而相对增加,最终风化趋势指向 A 点。经验结果显示未风化的长石 CIA 值为 50%,伊利石和蒙脱石分别为 75% 和 85%,高岭土和绿泥石则接近 100%<sup>[33]</sup>,这表明高岭石和绿泥石是黏土矿物演化的最终阶段。总的来说,不同程度石漠化剖面土壤的风化趋势存在一定差异,轻度石漠化剖面处于斜长石向伊利石的风化阶段,中度石漠化剖面土壤层基本处于斜长石向蒙脱石的风化阶段,而重度和极重度石漠化剖面均处在蒙脱石向高岭石的转化阶段,呈现出石漠化程度越高,土壤层风化程度越高的现象。



(a) 轻度石漠化 (b) 中度石漠化  
(c) 重度石漠化 (d) 极重度石漠化

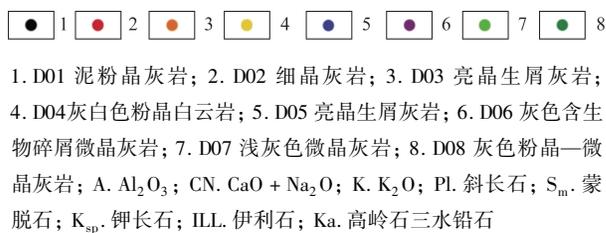


图 5 不同程度石漠化剖面 A - CN - K 三角图解  
Fig. 5 A - CN - K triangle diagrams in rocky desertification sections with different degrees

### 3.5 主量元素迁移率

在基岩风化成土过程中,活动性强的元素的淋失会引起稳定元素含量的相对增加,元素的绝对含量不能正确反映岩石风化成土过程中元素的地球化学行为<sup>[34]</sup>,因此本文采用迁移率来分析元素在风化过程中的迁移规律。一般认为在风化成土过程中 Th 元素较为稳定<sup>[35]</sup>,所以在本次研究中选取 Th 元素(表 2)作为参照元素计算各主量元素的迁移率。

由图 6 可知,除重度石漠化剖面外,其余剖面 Fe 元素未发生明显淋失,甚至出现轻微富集的现象,极重度石漠化剖面中富集现象尤为显著。研究区碳酸盐岩中 Fe 元素占比不足 2%,而极重度石漠化剖面土壤层的 Fe 元素占比高达 10.18%,具有显著的富集现象。土壤层中的 Fe 元素主要赋存于黏粒部分,具有随黏粒移动的可能性,而极重度石漠化土壤层中黏粒相对含量明显高于中度及重度石漠化(图 4),这可能是导致极重度石漠化剖面土壤层 Fe 元素异常聚集的原因。

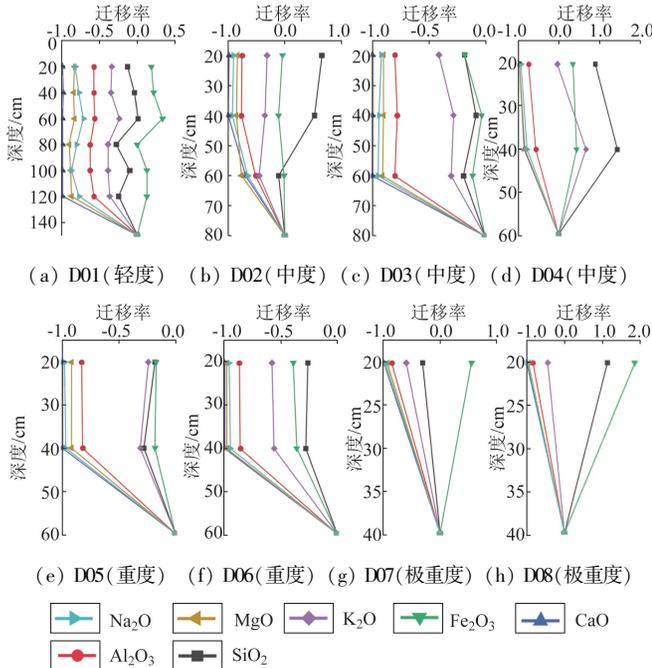


图 6 不同程度石漠化剖面主量元素迁移率

Fig. 6 Migration rate of major elements in rocky desertification sections with different degrees

剖面其他元素从基岩层到土壤层淋失程度较小的为 Si、K 和 Al, K 因在各剖面中元素含量极少,其淋失情况表现不明显,而 Si 和 Al 元素即使出现

了一定程度的淋失,依然是形成土壤层的主要元素。剖面中Ca和Mg元素的淋失极为强烈,在所有剖面中几乎全部淋失,这也说明了碳酸盐岩风化过程为富硅铝铁脱钙镁的过程,元素的迁移方式对土壤层厚度有着显著的影响。

## 4 讨论

### 4.1 碳酸盐岩成土能力

通过对不同程度石漠化剖面主量元素迁移率进行研究,发现各元素从基岩层到土壤层中元素淋失程度较小的为Fe、Si、Al,且这三者在土壤层含量极高。Ca、Mg、Na元素则表现为显著的淋失,K元素表现为轻度的淋失。基于此研究结果,可以用 $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 等易于淋失的易溶组分含量与酸不溶物质(如 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 等难溶组分)含量的比值来表征基岩风化成土能力:比值越大,易溶组分所占比例越高,成土能力越弱;比值越小,成土能力越强<sup>[1]</sup>。图7展示了剖面中易溶组分/难溶组分与土壤厚度的关系,由图可知易溶组分与难溶组分比值为负相关( $R^2 = 0.768$ )。难溶组分相对于易溶组分含量越高,成土能力越强,越容易形成较厚土壤层;难溶组分相对于易溶组分含量越低,即易溶组分/难溶组分比值越大,成土能力越弱,形成的土壤层越薄。

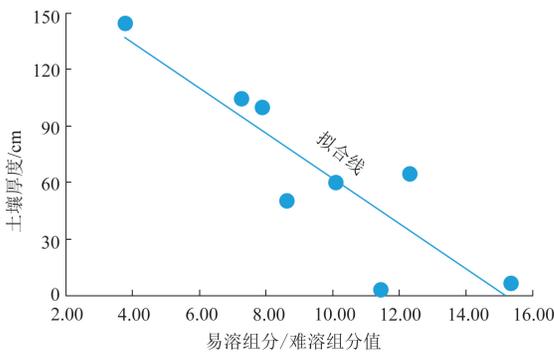


图7 易溶组分/难溶组分与土壤厚度的关系

Fig.7 Relationship between the ratio of soluble/insoluble components and soil thickness

### 4.2 石漠化生态地质作用模式及保护修复建议

贵州省石漠化区成土母岩以灰岩和白云岩为主,易溶物质含量较多,岩石风化成土量少,成土速度慢,由于不同岩性岩石的组成成分不同,在侵蚀和风化方式、生境组成、成土特点等方面存在较大的差异,因此形成的石漠化程度也不同。对于石漠化的

治理方法也应该因地制宜,顺应自然发展规律,不同程度石漠化地区采取不同的治理措施。

D01为轻度石漠化剖面,位于丘陵区,剖面基岩为粉泥晶灰岩,其易溶组分/难溶组分为3.74。剖面基岩难溶组分含量高且粒度小,比表面积高,易于溶蚀作用进行,成土能力强,但由于灰岩的差异性溶蚀作用,地表起伏度较大,形成土壤后易于发生土壤侵蚀,但对植被生长影响有限,植被整体长势相对较好,以乔木和灌木为主。在轻度石漠化地区,采取生态治理和经济发展相融合的新模式,以种植生态经济林、水果和草本植物为主,或结合喀斯特地区的环境特点,选择石生、耐旱、喜钙的植物种类,实现经济的可持续发展。

D02、D03和D04为中度石漠化剖面,D02位于丘陵区,基岩为细晶灰岩,D03位于威宁高原区,基岩为亮晶生屑灰岩,两个剖面易溶组分/难溶组分值分别为7.24和7.84,剖面基岩难溶组分含量较低,细晶灰岩粒度相对较大,比表面积低,限制溶蚀作用进行。亮晶生屑灰岩生物碎屑含量约70%,坚韧度小,抗压强度低,孔隙率大,岩石易于破碎,由于成分、结构的不均一性导致差异性溶蚀作用突出,使得土壤流失十分严重。D04位于丘峰台地区,母岩为粉晶白云岩,易溶组分/难溶组分为12.29,难溶组分含量极低,但由于白云岩地形相对较为平缓,水岩作用时间相对较长,风化形成的土壤层得以保留,使得白云岩与灰岩风化成土总量相当。但是土壤整体较薄,高大乔木无法生长,植被以灌木和草丛为主。在中度石漠化地区,采取退耕还林、坡坡为梯及筑墙护土等措施。

D05和D06为重度石漠化剖面,D05位于高原区,基岩为亮晶生屑灰岩,D06位于侵蚀陡坡区,剖面母岩为灰色含生物碎屑微晶灰岩。两剖面母岩易溶组分/难溶组分值分别为8.59和10.59,难溶组分含量低,基岩风化成土量较少,风化形成的土壤层薄,植被稀疏,以草本植被为主,见小面积基岩裸露。

D07和D08为极重度石漠化剖面,均位于丘峰台地区,D07剖面母岩为巨厚纯灰岩层,且方解石含量在95%以上。两剖面易溶组分/难溶组分值为11.41和15.30,难溶组分含量极低,在基岩风化成土过程中大量元素随水淋失,风化成土能力极弱,且由于灰岩差异性风化作用,地貌崎岖,地形陡峻,形成的土壤层难以保留,部分灰岩发育

溶孔,溶蚀作用更为强烈,只有在低洼地带可见到土壤残留,生长有稀疏草丛,坡度较大地区岩石裸露,植被无法生长。由于重度和极重度石漠化区生态环境极为脆弱,在该地区采取封山造林的措施,减少人类活动的干扰。

## 5 结论

(1)研究区内石漠化区基岩上覆土壤层是碳酸盐岩中易溶物质溶蚀及酸不溶物质在原地不断累积的结果,并未受到外来物质的明显影响。

(2)碳酸盐岩中酸不溶物质含量低是导致石漠化发生的根本原因。不同程度石漠化剖面均处于高等风化程度,剖面矿物风化趋势也呈现出石漠化程度越高,土壤层风化程度越高的现象。

(3)碳酸盐岩风化过程为富硅铝铁脱钙镁过程,元素的迁移方式对土壤层厚度有着明显的影响,所有剖面中主量元素相对于 Th 元素基本都出现了不同程度的淋失,其中 Ca 元素淋失程度最高,基本完全淋失,其次为 Na、Mg、Al 元素,而 Si 和 Fe 元素则表现为轻微的富集。

(4)不同程度石漠化与基岩风化成土过程中元素迁移方式密切相关,碳酸盐岩基岩中易溶组分含量越高,基岩风化产生的残余成土物质越少,石漠化发育程度越高。

## 参考文献 (References):

- [1] 肖春蕾, 聂洪峰, 刘建宇, 等. 生态-地质作用模式: 诠释表生地质过程与生态特征的耦合[J]. 中国地质调查, 2021, 8(6): 9-24.  
Xiao C L, Nie H F, Liu J Y, et al. Ecological and geological interaction model; the coupling of supergene geological processes and ecological characteristics[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(6): 9-24.
- [2] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-105.  
Wang S J. Concept deduction and its connotation of karst rocky desertification[J]. Carsologica Sinica, 2002, 21(2): 101-105.
- [3] 左雪. 喀斯特生态环境治理下土壤保持功能对石漠化的响应机制分析[J]. 林业科技情报, 2023, 55(1): 20-23.  
Zuo X. Analysis on the response mechanism of soil conservation function to rocky desertification under the control of karst ecological environment[J]. Forestry Science and Technology Information, 2023, 55(1): 20-23.
- [4] 宁小斌, 吴协保, 黄俊威, 等. 岩溶地区第四次石漠化调查主要结果及防治形势分析[J]. 林业资源管理, 2023(3): 9-14.  
Ning X B, Wu X B, Huang J W, et al. Main results of the fourth rocky desertification survey in karst area and analysis of rocky desertification control situation[J]. Forest Resources Management, 2023(3): 9-14.
- [5] 刘琦, 廖启迪, 姚邦杰. 碳酸盐岩的物性特征对岩溶石漠化成因的影响[J]. 实验室科学, 2021, 24(2): 87-94, 98.  
Liu Q, Liao Q D, Yao B J. Influence of physical characteristics of carbonate rocks on the genesis of karst rocky desertification[J]. Laboratory Science, 2021, 24(2): 87-94, 98.
- [6] 章明奎, 姚玉才, 邱志腾, 等. 中国南方碳酸盐岩发育土壤的成土特点与系统分类[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2019, 45(1): 54-65.  
Zhang M K, Yao Y C, Qiu Z T, et al. Pedogenetic characteristics and taxonomic classification of soils developed from carbonate rocks in the south of China[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Science), 2019, 45(1): 54-65.
- [7] 孙承兴, 王世杰, 周德全, 等. 碳酸盐岩差异性风化成土特征及其对石漠化形成的影响[J]. 矿物学报, 2002, 22(4): 308-314.  
Sun C X, Wang S J, Zhou D Q, et al. Differential weathering and Pedogenetic characteristics of carbonate rocks and their effect on the development of rock desertification in karst regions[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2002, 22(4): 308-314.
- [8] Miko S, Durn G, Prohić E. Evaluation of terra rossa geochemical baselines from Croatian karst regions[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1999, 66(1/2): 173-182.
- [9] 文林琴, 栗忠飞. 2004—2016年贵州省石漠化状况及动态演变特征[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 5928-5939.  
Wen L Q, Li Z F. Evolution characteristics of rocky desertification during 2004-2016 in Guizhou Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 5928-5939.
- [10] 陈起伟, 熊康宁, 兰安军. 基于GIS技术的贵州省土壤侵蚀危险性评价[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(12): 47-52, 66.  
Chen Q W, Xiong K N, Lan A J. Assessment of erosion risk in Guizhou province based on geological information system (GIS) technology[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(12): 47-52, 66.
- [11] 胡泽银, 王世杰, 白晓永, 等. 近百年来贵州高原气温时空演变特征及趋势[J]. 中国岩溶, 2020, 39(5): 724-736.  
Hu Z Y, Wang S J, Bai X Y, et al. Analysis of spatial-temporal evolution and trend of the air temperature over Guizhou plateau in the last hundred years[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(5): 724-736.
- [12] 贵州省地质调查院. 中国区域地质志·贵州志[M]. 北京: 地质出版社, 2017: 753-848, 937-1015.  
Guizhou Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of China·Guizhou[M]. Beijing: Geology Press, 2017: 753-848, 937-1015.
- [13] 杨胜元, 张建江, 赵国宣, 等. 贵州环境地质[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2008.  
Yang S Y, Zhang J J, Zhao G X, et al. Environmental Geology of Guizhou Province, China[M]. Guiyang: Guizhou Science and

- Technology Publishing House, 2008.
- [14] 李宗发. 贵州喀斯特地貌分区[J]. 贵州地质, 2011, 28(3): 177-181, 234.  
Li Z F. Division of karst landform in Guizhou[J]. Guizhou Geology, 2011, 28(3): 177-181, 234.
- [15] 陈清霞, 陆晓辉, 赵文轩, 等. 不同地形条件下贵州省主要土壤类型的空间分异[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(7): 205-213.  
Chen Q X, Lu X H, Zhao W X, et al. Spatial differentiation of main soil types in Guizhou Province under different topographical conditions [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(7): 205-213.
- [16] 王瑞, 安裕伦. 贵州省生物多样性及生境敏感性研究[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2014, 32(3): 28-33.  
Wang R, An Y L. The study on biodiversity and the sensitivity of bio-inhabitation in Guizhou[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Science), 2014, 32(3): 28-33.
- [17] 熊平生, 袁道先, 谢世友. 我国南方岩溶山区石漠化基本问题研究进展[J]. 中国岩溶, 2010, 29(4): 355-362.  
Xiong P S, Yuan D X, Xie S Y. Progress of research on rocky desertification in South China Karst Mountain[J]. Carsologica Sinica, 2010, 29(4): 355-362.
- [18] 张文源, 王百田. 贵州喀斯特石漠化分类分级探讨[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2015, 39(2): 148-154.  
Zhang W Y, Wang B T. Discussion on classification and gradation of Karst rocky desertification in Guizhou province[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2015, 39(2): 148-154.
- [19] 郑永春, 王世杰. 贵州山区石灰土侵蚀及石漠化的地质原因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 461-465.  
Zheng Y C, Wang S J. Geological cause of calcareous soil erosion and land rocky desertification in karst area, Guizhou province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(5): 461-465.
- [20] 冯志刚. 岩溶上覆风化壳的粒度分布特征及其对物源和形成过程的指示意义[D]. 贵阳: 中国科学院研究生院(地球化学研究所), 2004.  
Feng Z G. The Grain Size Distribution Characteristic of the Weathering Crusts Underlying Carbonatites and Its Indication Meaning on the Provenance and Formation Processes in Karst Terrains, Guizhou Province [D]. Guiyang: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Geochemistry), 2004.
- [21] Tole M P. The kinetics of dissolution of zircon ( $ZrSiO_4$ ) [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1985, 49(2): 453-458.
- [22] Nesbitt H W. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite [J]. Nature, 1979, 279(5710): 206-210.
- [23] Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44(11): 1659-1666.
- [24] Ji H B, Wang S J, Ouyang Z Y, et al. Geochemistry of red residua underlying dolomites in karst terrains of Yunnan - Guizhou Plateau: I. The formation of the Pingba profile [J]. Chemical Geology, 2004, 203(1/2): 1-27.
- [25] 王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(5): 441-449.  
Wang S J, Ji H B, Ouyang Z Y, et al. Preliminary study on weathering and pedogenesis of carbonate rock [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 1999, 42(6): 572-581.
- [26] Qiao Y S, Hao Q Z, Peng S S, et al. Geochemical characteristics of the eolian deposits in southern China, and their implications for provenance and weathering intensity [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2011, 308(3/4): 513-523.
- [27] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. Nature, 1982, 299(5885): 715-717.
- [28] McLennan S M. Weathering and global denudation [J]. The Journal of Geology, 1993, 101(2): 295-303.
- [29] 杨守业, 李从先, 李徐生, 等. 长江下游下蜀黄土化学风化的地球化学研究[J]. 地球化学, 2001, 30(4): 402-406.  
Yang S Y, Li C X, Li X S, et al. Geochemical records of chemical weathering of the Xiashu Loess in the lower reaches of the Changjiang River [J]. Geochimica, 2001, 30(4): 402-406.
- [30] Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance [J]. Geology, 1995, 23(10): 921-924.
- [31] Yan D T, Chen D Z, Wang O C, et al. Large-scale climatic fluctuations in the latest Ordovician on the Yangtze block, South China [J]. Geology, 2010, 38(7): 599-602.
- [32] 龙健, 李娟, 邓启琼, 等. 贵州喀斯特山区石漠化土壤理化性质及分形特征研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 635-639.  
Long J, Li J, Deng Q Q, et al. Soil properties and fractal features in the rocky desertification process of karst regions, Guizhou province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(4): 635-639.
- [33] 姜大伟, 张世民, 丁锐, 等. 龙门山南段青衣江阶地沉积物的化学风化特征及其意义[J]. 地质科学, 2016, 51(3): 763-778.  
Jiang D W, Zhang S M, Ding R, et al. The chemical weathering and its significance of Qingyi River terraces, south range of Longmen Shan [J]. Chinese Journal of Geology, 2016, 51(3): 763-778.
- [34] 王世杰, 孙承兴, 冯志刚, 等. 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, 2002, 22(1): 19-29.  
Wang S J, Sun C X, Feng Z G, et al. Mineralogical and geochemical characteristics of the limestone weathering profile in Jishou, western Hunan province, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2002, 22(1): 19-29.
- [35] 李建武, 张甘霖, 李德成, 等. 强烈风化条件下玄武岩发育土壤的元素地球化学特征[J]. 地球与环境, 2012, 40(4): 491-498.  
Li J W, Zhang G L, Li D C, et al. Mobilization and redistribution of elements in soils developed from extremely weathered basalts on the Hainan Island [J]. Earth and Environment, 2012, 40(4): 491-498.

## Geochemical process and ecogeological effects of bedrock weathering in the rocky desertification area of Guizhou Province

HUANG Yanpeng<sup>1</sup>, LIU Jianyu<sup>2</sup>, ZHANG Ce<sup>1</sup>, JIE Wenhui<sup>1</sup>, KANG Yihua<sup>3</sup>

(1. *Aerial Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Hebei Shijiazhuang 050002, China*; 2. *China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China*; 3. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** Rocky desertification is widely distributed in karst areas of Southwest China, especially in Guizhou Province, posing a serious threat to the local ecological environment security. In order to clarify the internal relationship between the bedrock weathering and the degree of rocky desertification, the authors in this paper comprehensively analyzed the content of major and trace elements and the law of migration and evolution, mineral composition characteristics, and the ability of weathering and soil formation for the rocky desertification sections with different desertification degree in Guizhou Province. The results show that the soil material in rocky desertification area is the result of soluble material dissolution in carbonate rocks and the continuous accumulation of acid insoluble material in situ. The rocky desertification sections with different degrees are in a high degree of weathering, and mineral weathering trend in sections, also shows that the higher the degree of rocky desertification, the higher the degree of soil layer weathering phenomenon. The development of rocky desertification is closely related to the migration model of elements in the process of bedrock weathering. The higher the content of soluble elements in carbonate bedrocks, the less the residual soil material produced by bedrock weathering, and the higher the development degree of rocky desertification. The analysis of the geochemical characteristics of bedrock and ecological geological effects of weathering in the rocky desertification area could provide some references for the study of the genetic mechanism of rocky desertification, and is also of great significance to the rocky desertification controlling and the promotion of the sustainable development of regional economy.

**Keywords:** ecogeology; bedrock weathering; geochemistry; rocky desertification; carbonate rocks

(责任编辑: 魏昊明)