

基于结构体的峨眉山玄武岩风化程度评价(IV): 风化指数 FF

徐则民^{1,2} 黄润秋²

(1.昆明理工大学土木系, 云南 昆明 650224; 2.地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要:岩石化学风化程度评价指标应该同时满足以下三个基本条件,即与风化程度之间的关系简单明确、对风化程度变化有足够的敏感性和易于确定和不易受到人为因素影响。作为铁镁质岩石的主要代表,(峨眉山)玄武岩风化程度评价除考虑可引起组分淋失与富集的水解反应外,还应充分考虑二价铁的氧化反应。新鲜峨眉山玄武岩中并存的二价铁和三价铁的含量总体稳定,910 个样品的 FeO、Fe₂O₃ 平均含量分别为 8.45%和 5.15%,以均匀、随机的方式赋存于辉石、橄榄石、杏仁体中的绿泥石、磁铁矿及火山玻璃中。风化玄武岩、玄武岩斜坡地下水及新鲜玄武岩浸泡液的地球化学研究表明,FeO 及 Fe₂O₃ 含量对峨眉山玄武岩风化程度的敏感性明显高于其他组分,同时铁又是玄武岩风化过程中活性最差的元素之一。三价铁和二价铁的摩尔数比值(FF)适合于峨眉山玄武岩整个风化过程的风化程度判别,比既有风化指数具有更高的分辨率,尤其是对风化初期玄武岩。

关键词:峨眉山玄武岩;化学风化指数;三价铁与二价铁摩尔数比值

中图分类号: p512.1⁺2;P588.14⁺5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)06-1942-07

一般来说,化学风化的评价指标(indicator)应该满足以下几个条件:第一,与风化程度之间的关系明确、简单,地球化学机理清晰,要么正相关,要么负相关;第二,对风化程度变化有足够的敏感性;第三,易于确定,不易受到人为因素的影响。既有风化指数所强调的主要是硅酸盐的水解反应及其引起的组分淋失与富集(depletion-enrichment),而由于岩石风化主要发生在非饱和带、淋失条件较差,已经发生明显风化的岩石,其组分的淋失与相对富集往往并不显著^[1]。作为铁镁质岩石的主要代表,(峨眉山)玄武岩风化过程中还存在另外一类重要反应——二价铁的氧化反应。除硅、铝外,铁也是玄武岩中含量最多的元素,其中既有二价铁,又有三价铁。随着风化程度的提高,即使是在其他组分无明显淋失与富集的情况下,岩石中的二价铁和三价铁含量也会此消彼

长,峨眉山玄武岩风化程度指示元素选择应充分考虑铁元素^[1-3]。

1 峨眉山玄武岩中的铁

在峨眉山玄武岩核心区 6 个区域采集的 29 个新鲜玄武岩样品的 FeO 和 Fe₂O₃ 平均含量分别为 8.28%和 5.01%;文[4]报道的峨眉山玄武岩西、中、东 3 个岩区 668 个样品的 FeO 和 Fe₂O₃ 平均含量分别为 7.97%和 5.46%;文[5]报道的 204 个峨眉山玄武岩的 FeO 和 Fe₂O₃ 平均含量分别为 9.09%和 4.97%(文[2]表 2)。由此可见,峨眉山玄武岩中并存的二价铁和三价铁的含量总体稳定,910 个样品的 FeO、Fe₂O₃ 平均含量分别为 8.45%和 5.15%。

对白鹤滩电站 21 件新鲜岩样的镜下鉴定发现,玄武岩具有显微斑状结构及间粒间隐结构,由 25%~

收稿日期:2012-07-04;改回日期:2012-09-15

基金项目:国家自然科学基金-云南联合基金重点项目(U1033601)、国家自然科学基金面上项目(40572159, 40772189)、教育部高等学校博士点基金项目(20135314110005)及地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(GZ2007-1, GZ2009-10)联合资助。

作者简介:徐则民,男,1963 年生,博士,教授,博士生导师,水文地质工程地质专业,目前主要从事滑坡灾害孕育过程研究;
E-mail:abc5100@188.com。

50%的斜长石、8%~35%的辉石、1%~10%的橄榄石、10%~40%的火山玻璃、1%~22%的杏仁体、6%~25%的金属矿物组成。铁主要赋存于辉石、橄榄石、杏仁体(绿泥石)和金属矿物之中,而火山玻璃中也会含有一定量的铁。

白鹤滩峨眉山玄武岩中的辉石主要以微晶形式出现在基质中,21件样品中只有2件出现辉石斑晶,含量1%~3%。微晶辉石含量8%~35%,多数在20%~30%,无色,部分发生了绿泥石化,短柱状-粒状,粒径0.03~0.4 mm, $c \wedge Ng=41^\circ\sim 45^\circ$,均属普通辉石(Px)(图1,正交偏光)。普通辉石分子式为 $Ca(Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Ti, Al)[(Si, Al)_2O_6]$,其中既含有 Fe^{2+} ,又含有 Fe^{3+} 。

含铁矿物橄榄石的化学式为 $R_2[SiO_4]$,其中R主要为 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} ,有时还有 Ni^{2+} 、 Co^{2+} 、 Zn^{2+} 。白鹤滩峨眉山玄武岩中的橄榄石(Ol)要么以斑晶出现(图2),要么在斑晶和基质中同时出现,有时也仅见于基质中,呈自形短柱状、柱状、熔蚀短柱状、粒状,粒径0.1~1 mm,部分被其他矿物取代而以假象出现。

含铁矿物绿泥石的一般分子式为 $X_mY_4O_{10}(OH)_s$, $X=Li^+$ 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Mg 、 Mn 、 Cr^{3+} ; $Y=Si$ 、 Al 。峨眉山玄武岩中的绿泥石主要以填隙物形式充填气孔,形成杏仁状构造。杏仁体在峨眉山玄武岩中十分常

见,既存在于肉眼可以识别的气孔-杏仁状玄武岩中,也以微杏仁、显微杏仁的形式存在于斜斑玄武岩、无斑玄武岩和柱状节理玄武岩中。杏仁体浑圆状—不规则状,直径0.05~5 mm,一般0.1~2 mm;多具环带状构造,充填物主要为绿泥石、绿帘石(图3),此外还有粗晶方解石、绿帘石、黝帘石、蛋白石、沸石、玉髓及石英等。

峨眉山玄武岩中的金属矿物主要为原生磁铁矿($Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4$, FeO 占31.03%, Fe_2O_3 占68.97%)或钛磁铁矿($TiO_2>25%$),少量次生针铁矿($FeOOH$),出现于全部熔岩样品的基质中,含量4%~25%,一般6%~10%,多为自形—半自形微粒状、少数长条状,粒径 ≤ 0.08 mm,个别达到0.5 mm,均匀散布于长石、辉石之间,橄榄石及火山玻璃之间(图4)。

综上所述,峨眉山玄武岩中并存的二价铁和三价铁含量总体稳定, FeO 、 Fe_2O_3 平均含量分别为8.45%和5.15%,主要赋存于辉石、橄榄石、杏仁体(绿泥石)、磁铁矿、钛磁铁矿及火山玻璃中。

2 风化过程中峨眉山玄武岩中铁的地球化学行为

文[1]图4~11及图14-e、f表明,对于采自峨眉山玄武岩核心区7个区域的13个结构体,无论是风化程度较低的A组结构体还是风化程度较高的B

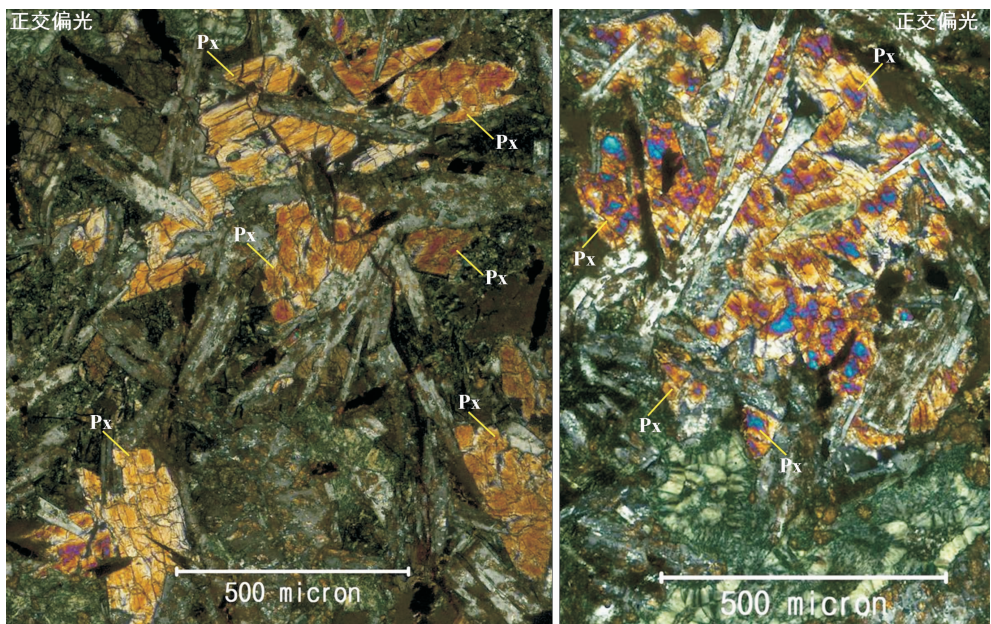


图1 白鹤滩电站峨眉山玄武岩中的辉石(Px)

Fig.1 Pyroxene (Px) in Emeishan basalt from Baihetan power station

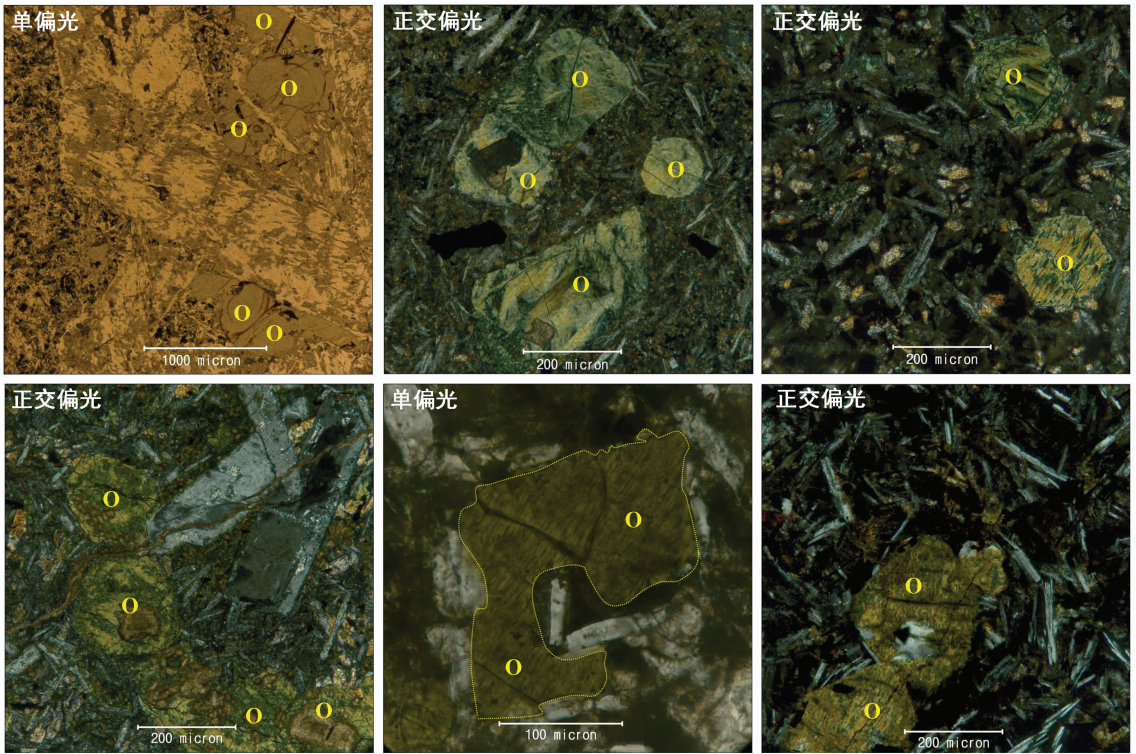


图2 白鹤滩电站峨眉山玄武岩中的橄榄石(O)
Fig.2 Olivine (O) in Emeishan basalt from Baihetan power station

组结构体,核心石 FeO 均比腐岩壳高,而 Fe₂O₃ 恰好相反;对于 A 组结构体,除 FeO、Fe₂O₃ 之外的其余 10 个主成分及 LOI 均未出现这种统一降低或升高的变化规律^[1],说明 FeO 及 Fe₂O₃ 含量对峨眉山玄武岩风化程度的变化是敏感的,而且这种敏感性要高于其他组分。

玄武岩斜坡地下水及新鲜玄武岩浸泡液的化学组分分析结果(文[2]表 1、文[2]表 3)表明,玄武岩风化过程中,既无 Fe²⁺也无 Fe³⁺析出,岩石中减少的二价铁等量转化为三价铁而滞留于风化产物中,从绝对含量上看,总铁在风化过程中是稳定的,铁是玄武岩风化过程中惰性程度最高的元素之一。

风化玄武岩、玄武岩斜坡地下水及玄武岩浸泡液中的 Fe 含量及其变化不是随机的,而是受到 Fe 元素表生地球化学行为的控制。含二价铁的矿物在风化过程中是最不稳定的^[6,7],Fe²⁺易于转化为 Fe₂O₃,而由于 Fe₂O₃ 的难溶性,FeO 的减少必然引起 Fe₂O₃ 的同步增大。因此,FeO、Fe₂O₃ 含量的此消彼长对玄武岩风化程度的指示性要高于其他组分,尤其是在风化的初期阶段。

此外,文[3]的研究已经表明,对于风化程度较低的 A 组结构体,从核心石到腐岩壳,碱/倍半氧化物、SF、Kr、硅/倍半氧化物和 B 值均出现了统一降低,而这一规律所以出现是因为这些指数的分母中所含 Fe₂O₃ 的一致增大,而非其他组分的淋失或富集,Fe₂O₃ 应该成为风化程度评价需要考虑的重要因素。

综上所述,多方面的证据表明,峨眉山玄武岩风化程度评价过程中应充分考虑不同价态铁元素的含量变化。

3 峨眉山玄武岩风化指数 FF

由于 FeO 与 Fe₂O₃ 含量之间的此消彼长关系,峨眉山玄武岩风化程度评价中单独考虑 FeO 或 Fe₂O₃ 是不全面的。

综合考虑 FeO 和 Fe₂O₃ 的一种方式是用两者的相对含量之和(∑Fe)来表示风化程度。图 5 给出了 13 个玄武岩结构体从核心石到腐岩壳时 ∑Fe 的变化情况,该图中同时标示了 29 个新鲜玄武岩样品(FB—fresh basalt) ∑Fe 的平均值(文[2]表 2)。图 5-a 表明,风化程度较低的 A 组结构体中,从核心石到

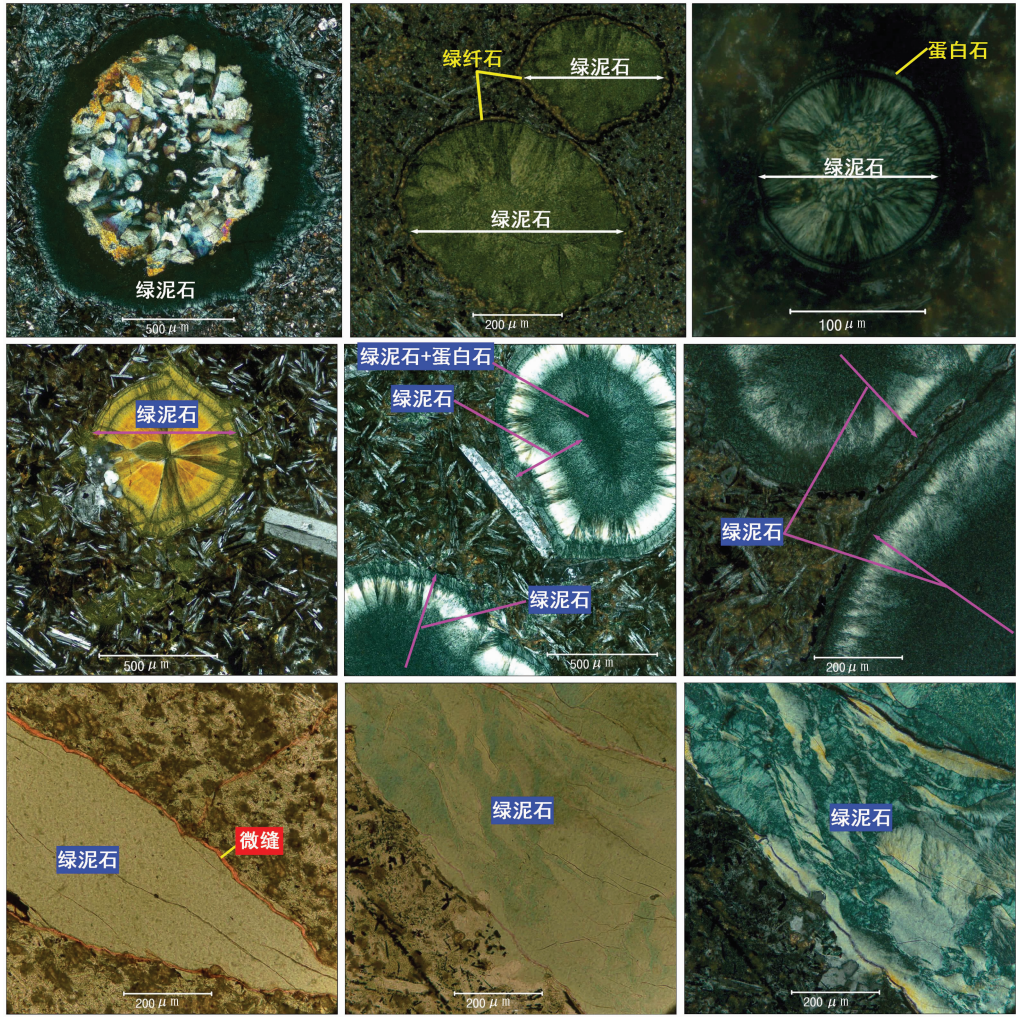


图 3 白鹤滩电站峨眉山玄武岩杏仁体中的绿泥石

Fig.3 Chlorite in almond-shaped structure in Emeishan basalt from Baihetan power station

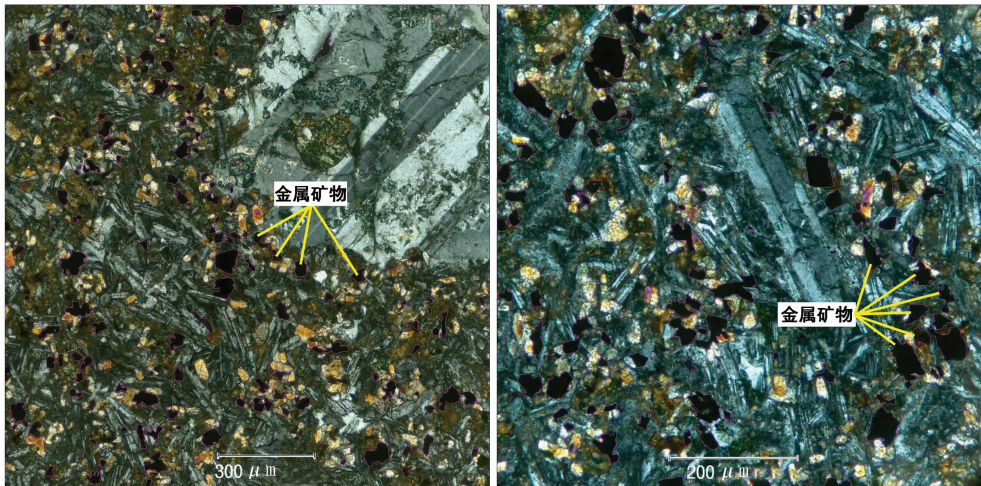


图 4 白鹤滩电站峨眉山玄武岩中的金属矿物

Fig.4 Metallic minerals in Emeishan basalt from Baihetan power station

腐岩壳,4个结构体的 ΣFe 有所增大,B1、B2和B4不升反降。对于风化程度较高的其余6个结构体,腐岩壳的 ΣFe 均比核心石高(图5-b)。可见 ΣFe 对风化初期玄武岩风化程度的指示性也不高,主要原因在于这一时期的组分淋失尚不明显。

由于Fe在风化过程是惰性的, ΣFe 所依据的也是组分淋失-富集思想,即其他元素的淋失导致 ΣFe 的升高,因此,当玄武岩风化过程中的组分淋失还不显著时, ΣFe 的指示性也必然较差。

综合考虑FeO和 Fe_2O_3 的另一种方式是采用三价铁和二价铁的原子(离子)的摩尔数的比值(FF),即:

$$\text{FF} = \text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+} = 2\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeO}$$

图6给出了13个玄武岩结构体从核心石到腐岩壳时的FF变化情况,图中同时标示了新鲜玄武岩(FB)的FF指数0.55(采用3个来源的901个样品的FeO、 Fe_2O_3 平均值计算,文[2],表2)。

图6-a表明,对于风化程度较低的A组结构体,从核心石到腐岩壳,FF表现为一致增大,这是

Fe_2O_3 统一增大、FeO同步降低的显现而不是随机的(文[1]表2);7个结构体中,S结构体的风化程度最高、T1最低,这一判断与样品的宏观风化特征(文[1]图4、图6、图11)是吻合的,FF对风化初期玄武岩的风化程度也具有很好的指向性。

文[3]的研究表明,既有风化指数中,对玄武岩风化中后期风化程度指示性相对最好的是碱/铝指数、碱/倍半氧化物指数和硅/倍半氧化物,三者指向的B组结构体中风化程度排在前三位的分别为“L1、A、K”、“L1、K、A”和“L1、A、K”(文[3]图2-j、1;文[3]图5-h)。图6-b中FF指向的B组结构体中风化程度排在前三位的是K、L1和A,与前三者基本一致,说明FF对风化中后期玄武岩的风化程度也具有较好的指向性。

此外,文[3]讨论的18个既有风化指数中,除了明显不合理的A、B和B1外,还有15个,其中13个都表明X是风化程度较高的6个B组结构体(个别为5个)中风化程度最低的,这与FF的判别结果略有差异,后者判定X的风化程度在B组中倒数第二

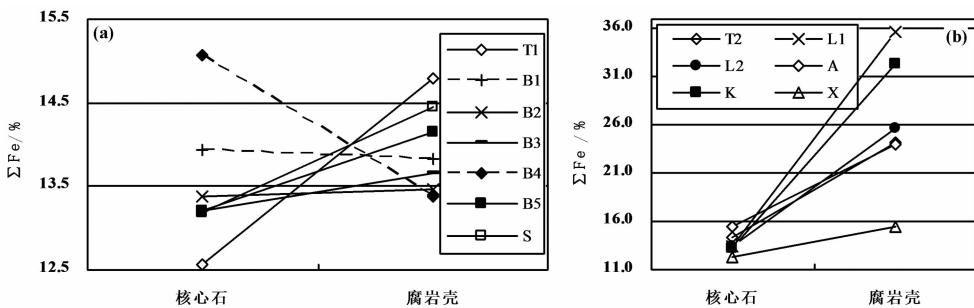


图5 腐岩壳与核心石的总铁含量差异

Fig.5 Total iron content difference between basalt saprolite crusts and corestones

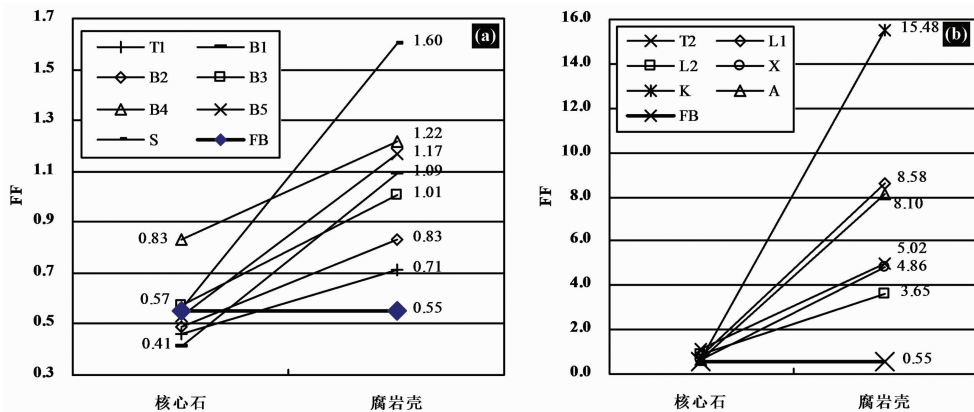


图6 腐岩壳与核心石的FF差异

Fig.6 FF difference between basalt saprolite crusts and corestones

而非最低(图6-b)。造成这种差异的主要原因在于前13个指数关注的主要是组分淋失与富集,而后者则着眼于铁的价态转变,在无明显组分淋失-富集时,二价铁可能已经发生较大规模的氧化反应,这时FF对风化程度具有更高的分辨率。

如文[1]图2所示,由于新鲜玄武岩的渗透率很低,风化初期进入结构体边缘的只能是水汽,这些含氧水汽与造岩矿物及火山玻璃首先进行的化学反应就应该是二价铁的氧化反应,而这一时期,由于充气壳状结构层的低渗透特性,溶出组分无法淋失,全岩组分的淋失-富集并不显著,只有铁的价态转变是显著的。随着时间的加长,充气壳状结构层中的水循环条件逐渐变好,组分淋失-聚集逐渐显现并越来越明显,而在此过程中,铁的价态转变也会随着通水-通气条件的改善而加剧。因此,FF适合于峨眉山玄武岩整个风化过程的风化程度判别,比既有风化指数具有更高的分辨率,尤其是对风化初期玄武岩。

4 结论

(1)作为铁镁质岩石的主要代表,峨眉山玄武岩风化程度评价除考虑可引起组分淋失与富集的水解反应外,还应充分考虑二价铁的氧化反应。

(2)新鲜峨眉山玄武岩中并存的二价铁和三价铁的含量总体稳定,910个样品的FeO、Fe₂O₃平均含量分别为8.45%和5.15%,以均匀、随机的方式赋存于辉石、橄榄石、杏仁体(绿泥石)、磁铁矿、钛磁铁矿及火山玻璃中。

(3)风化玄武岩、玄武岩斜坡地下水及新鲜玄武岩浸泡液的地球化学研究结果表明,FeO及Fe₂O₃含量对峨眉山玄武岩风化程度的敏感性要明显高于其他组分。此外,玄武岩风化过程中,无Fe²⁺和Fe³⁺淋失,铁是玄武岩风化过程中活性最差的元素之一。

(4)三价铁和二价铁的摩尔数比值(FF)适合于峨眉山玄武岩整个风化过程的风化程度判别,比既有风化指数具有更高的分辨率,尤其是对风化初期玄武岩。

致谢: 本项工作涉及范围广、研究周期长、研究区工作条件复杂,博士和硕士研究生唐正光、张黎明、陈积普、王志兵、申林方、王朝阳、刘泉、王志强、王红晓及魏力等参加了现场调查、监测及室内试验和资料整理工作。感谢油气藏地质及开发工程国家重点实验室和云南地质矿产开发局中心实验室在样品分析测试中所给予的帮助。

参考文献(References):

- [1] 徐则民, 黄润秋. 基于结构体的峨眉山玄武岩风化程度评价(I): 风化结构体地球化学[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 895-908.
Xu Zemin, Huang Runqiu. Assessment of the intensity of Emeishan basalt weathering based on rock blocks (I): geochemistry of weathered basalt blocks [J]. Geology in China, 2013, 40 (3): 895-908(in Chinese with English abstract).
- [2] 徐则民, 黄润秋. 基于结构体的峨眉山玄武岩风化程度评价(II): 玄武岩斜坡地下水及浸泡液水文地球化学[J]. 中国地质, 2013, 40(4): 1298-1306.
Xu Zemin, Huang Runqiu. Assessment of the intensity of Emeishan basalt weathering based on rock blocks (II): hydrogeochemistry of the groundwater in the basalt slope and basalt soaking solution [J]. Geology in China, 2013, 40(4): 1298-1306(in Chinese with English abstract).
- [3] 徐则民, 黄润秋. 基于结构体的峨眉山玄武岩风化程度评价(III): 既有风化指数评价[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1655-1665.
Xu Zemin, Huang Runqiu. Assessment of the intensity of Emeishan basalt weathering based on rock blocks (III): Assessment of existing chemical weathering indices [J]. Geology in China, 2013, 40(5): 1655-1665(in Chinese with English abstract).
- [4] 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜. 攀西裂谷[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 163.
Zhang Yunxiang, Luo Yaonan, Yang Chongxi. Pan-xi Rift [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 163(in Chinese).
- [5] 邱家骧. 岩浆岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 110.
Qiu Jiexiang. Magmatic Petrology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001: 110(in Chinese).
- [6] 牟保磊. 元素地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1999: 41.
Mu Baolei. Element Geochemistry [M]. Beijing: Peking University Press, 1999: 41(in Chinese).
- [7] Moon V, Jayawardane J. Geomechanical and geochemical changes during early stages of weathering of Karamu Basalt, New Zealand [J]. Engineering Geology, 2004, 74: 57-72.

The assessment of the weathering intensity of Emeishan basalt based on rock blocks(IV): A proposed weathering index (FF)

XU Ze-min^{1,2}, HUANG Run-qiu²

(1. Department of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650224, Yunnan, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: The index used to evaluate chemical weathering degree of rock should have simple, specific relationship with the weathering degree and sufficient sensitivity to rock weathering. In addition, it should be easily determined and should not be subject to human factors. Emeishan basalt is a typical representative of mafic rocks. Besides the hydrolysis reaction that may cause leaching and enrichment of components, the oxidation of divalent iron should also be taken into account in the evaluating process for the weathering intensity of Emeishan basalt. Bivalent and trivalent iron content in fresh Emeishan basalts is stable in general. Average values of FeO and Fe₂O₃ of 910 samples are 8.45% and 5.15% respectively. They occur uniformly and randomly in pyroxene, olivine, chlorite in almond-shaped structure, magnetite, titanium magnetite and volcanic glass. The geochemistry and hydrogeochemistry of the weathered basalt, the groundwater on a basalt slope and the soaking solution of the fresh basalt show that FeO and Fe₂O₃ are more sensitive to the weathering degree of Emeishan basalt than other components, while iron is one of the most immobile major elements in basalt weathering process. Trivalent iron to divalent iron molar ratio (FF) is suitable for discriminating the weathering degree in the whole weathering process of Emeishan basalt and has higher resolution than the existing weathering indices, especially in the early weathering stage of basalt.

Key words: Emeishan basalt; chemical weathering index; trivalent iron to divalent iron molar ratio

About the first author: XU Ze-min, male, born in 1963, professor and doctor, mainly engages in the study of predispose process of landslide hazards; E-mail: abc5100@188.com.