

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

徐则民^{1,2} 黄润秋²

(1.昆明理工大学土木系,云南 昆明 650500;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:以峨眉山玄武岩核心区 7 个区域的 13 个具有壳核结构的玄武岩结构体为基础,对主要风化指数的适宜性进行了研究。18 个风化指数均不适合于风化初期的峨眉山玄武岩风化程度评价。能够指示风化中后期峨眉山玄武岩风化程度的指数包括 Parker 指数、BA₁、BA、BA₃、BA₂、碱/铝指数、碱/倍半氧化物指数、WPI、SA、SF、K_r、硅/倍半氧化物、CIW、CIA 及 LOI,其中更为合理的是碱/铝指数、碱/倍半氧化物指数和硅/倍半氧化物。17 个风化指数中,指示性最差的是 A、B 和 B₁。Fe₂O₃ 控制着风化初期峨眉山玄武岩碱/倍半氧化物指数、SF、K_r 及硅/倍半氧化物的变化,应成为风化程度评价需要考虑的重要因素。

关键词:峨眉山玄武岩;风化程度;化学风化指数;适宜性

中图分类号:P512.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2013)05-1655-11

20 世纪 40 年代以来,人们已经提出了 30 多个用来定量评价岩石化学风化程度的化学风化指数。由于岩石化学风化过程很大程度上是活动性(M-mobile)组分淋失、惰性(IM-Immobil)组分相对富集的过程,绝大多数化学风化指数都是以全岩化学成分为基础的。除 Parker 指数外,大部分风化指数都以主要氧化物摩尔数比值(molecular ration)的方式表达,不用比值形式表达的只有烧失量^[1]。从选择的观察元素,即比值中的分子来看,风化指数可以分为强调碱及碱土金属淋失、强调硅淋失、强调铝富集和 LOI 4 个大类。本文根据文[2]中图 4~11 所示结构体的风化程度及其全岩化学成分,研究了既有的主要风化指数对峨眉山玄武岩风化程度评价的适宜性。

1 碱及碱土金属

根据对比元素的种类,以碱及碱土金属为观察元素的风化指数可以分为 M、M/IM、M/(M+IM)和 M/M 4 类。

(一)M

Parker 指数 = $(2\text{Na}_2\text{O}/0.35 + \text{MgO}/0.9 + 2\text{K}_2\text{O}/0.25 + \text{CaO}/0.7) \times 100$

(二)M/IM

$\text{BA}_1 = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3$

$\text{BA} = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}) / \text{Al}_2\text{O}_3$

$\text{BA}_3 = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{MgO}) / \text{Al}_2\text{O}_3$

$\text{BA}_2 = (\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{Al}_2\text{O}_3$

碱/铝 = $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}) / \text{Al}_2\text{O}_3$

收稿日期:2012-07-06;改回日期:2012-09-19

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(20060674009)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)资助成果。

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。

碱/倍半氧化物 = $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{CaO}) / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$

(三) $M / (M + \text{IM})$

$\text{WPI} = 100 (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} - \text{H}_3\text{O}^+) / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO})$

(四) M / M

$A = \text{K}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{O}$

1.1 碱及碱土金属 (M)

文[3]综合前人研究成果提出,硅酸盐的最终风化过程可以表示为矿物结构中 Na、Ca、Mg、K 与 H 的交换过程,而在此过程中可能存在,也可能不存在 Si 的淋失;导致岩石物理裂解的水解作用及伴随的 Na、Ca、Mg、K 析出 (removal) 是温湿气候区硅酸盐岩风化的最主要过程;尽管风化期间 Si 是趋向活动的,但它在剖面上的迁移往往是无规律的,其总淋失比例通常很小,而碱金属和碱土金属则会发生显著流失。基于上述思想,该文提出了被后人称为 Parker 指数的化学风化评价指标:

$$[(\text{Na})_a / (\text{Na}-\text{O})_b + (\text{Mg})_a / (\text{Mg}-\text{O})_b + (\text{K})_a / (\text{K}-\text{O})_b + (\text{Ca})_a / (\text{Ca}-\text{O})_b] \times 100$$

式中, $(\text{X})_a$ 为元素 X 的原子比例, $(\text{X}-\text{O})_b$ 为元素 X 与 O 的键强度, Na、Ca、Mg、K 分别取值 0.35、0.9、0.25 和 0.7。根据 Parker 指数原理,随着风化程度的提高,其数值越低。

图 1 给出了文[2]中图 4~11 所示 13 个玄武岩结构体 (下同) 从核心石到腐岩壳时的 Parker 指数变化情况,图中同时标示了新鲜玄武岩 (FB-fresh basalt; 文[4]表 2,下同) 的 Parker 指数。对比文[2]图 4~11 可以看出,对于风化程度较低的 A 组结构体,

从核心石到腐岩壳, Parker 指数没有出现有规律的变化, 7 个结构体中 3 个表现为小幅升高, 4 个则显现不同程度的降低 (图 1-a); 对于风化程度较高的 B 组结构体^②, 腐岩壳的 Parker 指数均比核心石低, 其中风化程度最低的 X 的 Parker 指数变幅最小 (图 1-b)。图 1 表明, Parker 指数能够在一定程度上反映峨眉山玄武岩的风化程度, 但仅适合于风化程度较高的结构体。

1.2 碱及碱土金属/惰性组分 (M/IM)

BA_1 、 BA 、 BA_3 和 BA_2 均用岩石中碱及碱土金属氧化物摩尔数与铝氧化物的摩尔数比值表示; 同样用氧化物摩尔数比值表示的碱/铝指数 (bases: alumina) 和碱/倍半氧化物指数 (bases: R_2O_3)^[1] 与 BA_1 、 BA 、 BA_3 和 BA_2 类似, 但所考虑的因素似乎更为全面。根据元素风化过程中的地球化学行为, 6 个指数均应与岩石风化程度呈负相关, 即风化程度越高, 4 个指数应该越小。图 2 集中给出了 13 个玄武岩结构体从核心石到腐岩壳时 6 个指数的变化情况。

对于风化程度较低的 A 组结构体, 从核心石到腐岩壳, BA_1 也没有出现有规律的变化, 7 个结构体中 2 个表现为小幅降低、5 个显现不同程度的升高 (图 2-a); 对于风化程度较高的 B 组结构体, 腐岩壳 BA_1 均比核心石低, 其中风化程度最低的 X 的 BA_1 也处于最低水平 (图 2-b), 其余 5 个样品的 BA_1 变幅差异不是很明显。

岩石风化过程中, 钠、钾的活动性较强, 而铝主要表现为惰性, 用 BA_1 判别岩石风化程度的地球化学意义是明确的。但是, 由于风化初期岩石组分的淋失不是很明显, 而风化中后期析出的钾又易被次生

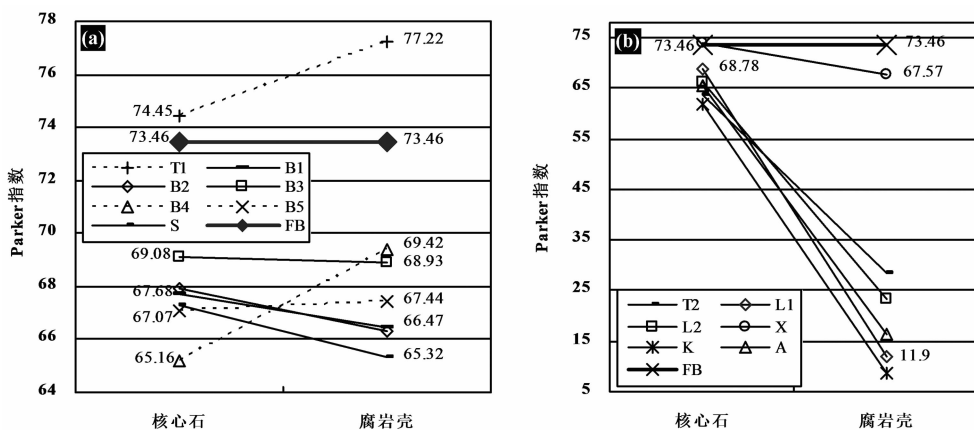


图 1 腐岩壳与核心石的 Parker 指数

Fig.1 Parker index difference between basalt saprolitized crusts and corestones

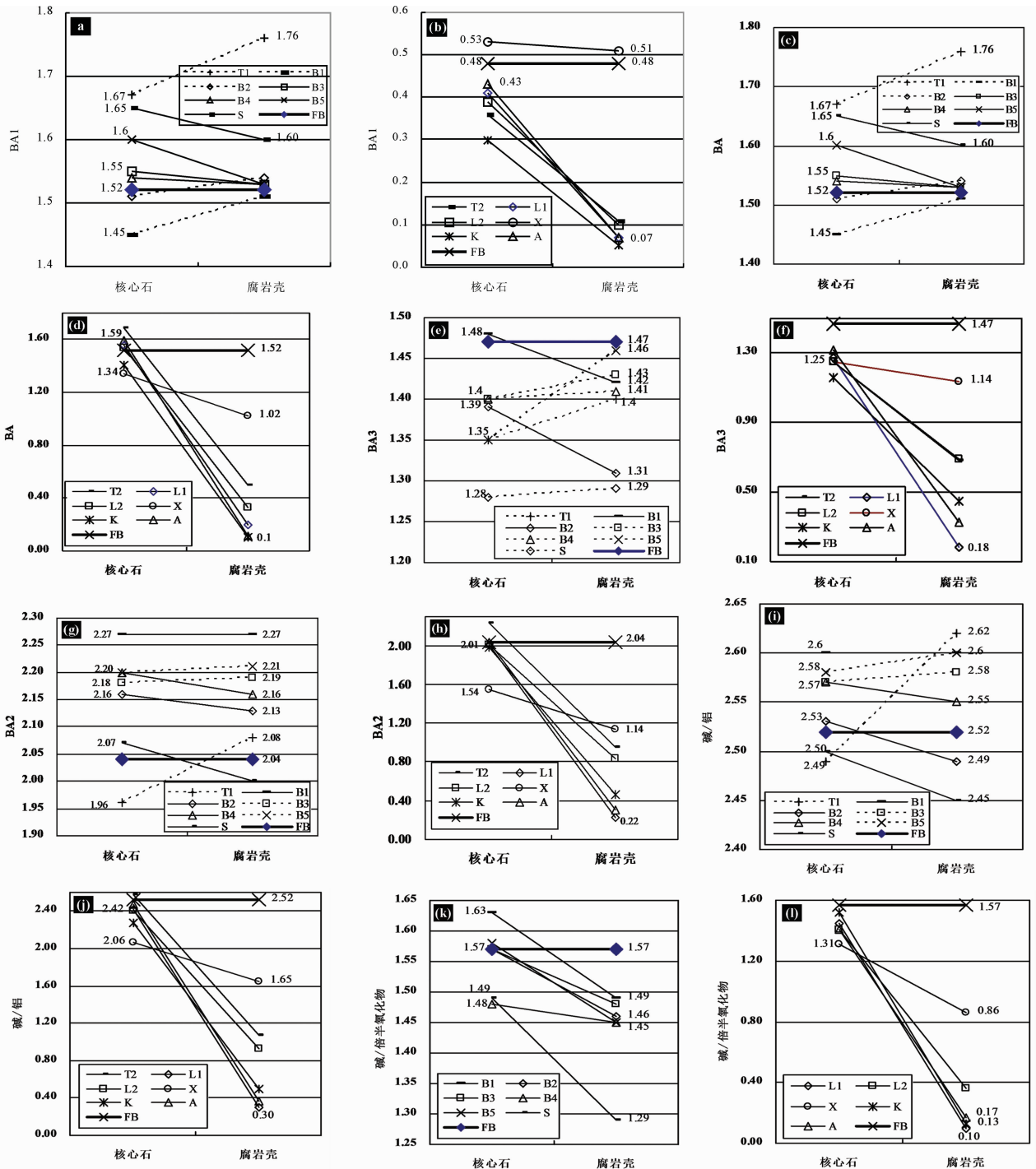


图 2 腐岩壳与核心石的碱及碱土金属/惰性组分风化指数差异

Fig.2 Weathering index difference between basalt saprolited crusts and corestones

粘土矿物吸附, BA_1 对风化程度变化的敏感性不是很高, 仅适合于风化程度差异较大的样品判别。

对于风化程度较低的 A 组结构体, 从核心石到腐岩壳, BA 没有出现有规律的变化, 而且变幅均很小, 7 个结构体中 3 个表现为小幅升高、4 个显现不同程度的降低(图 2-c); 对于风化程度较高的 B 组结构体, 腐岩壳的 BA 均比核心石低, 其中风化程度最低的 X 的 BA 也处于最低水平(图 2-d), 其余 5 个样品的 BA 变幅差异不是很明显。

与 BA 相比, BA_1 尽管增加了一个活动性更强的元素, 但对玄武岩风化程度的敏感度及指示性并无明显变化, 主要也应该与风化初期组分淋失微弱和风化中后期的钾吸附有关。

从核心石到腐岩壳, 风化程度较低的 A 组结构体的 BA_3 依然没有出现有规律的变化, 7 个结构体中 5 个表现为小幅升高、2 个降低(图 2-e); 对于风化程度较高的 B 组结构体, 腐岩壳的 BA_3 均比核心石低, 其中风化程度最低的 X 的 BA_3 也处于最低水平(图 2-f), 其余 5 个样品的 BA_3 变幅差异不是很明显。

与 BA 相似, 当风化程度较低时, BA_3 的敏感度也较低, 基本无指示性作用, 当风化进入有显著组分流失的中后期时, 其指示作用较强。

BA_2 在风化程度较低的 A 组结构体的核心石到腐岩壳之间仍然没有出现有规律的变化, 7 个结构体中 3 个表现为小幅升高、3 个降低、一个没变化(图 2-g); 对于风化程度较高的 B 组结构体, 腐岩壳的 BA_2 均比核心石低, 其中风化程度最低的 X 的 BA_2 也处于最低水平(图 2-h)。风化程度较低时, BA_2 无指示作用, 当风化进入有显著组分流失的中后期时, 指示作用较强。

碱/铝指数在风化程度较低的 A 组结构体的核心石到腐岩壳之间没有出现统一下降, 7 个结构体中 3 个表现为小幅升高、3 个小幅降低、一个未变(图 2-i); 对于风化程度较高的 B 组结构体, 腐岩壳的碱/铝指数均比核心石低, 其中风化程度最低的 X 的碱/铝指数也处于最低水平(图 2-j), 其余 5 个样品的差异不是很大。

与 BA_1 、 BA 、 BA_3 和 BA_2 相似, 当风化程度较低时, 碱/铝指数的敏感度也比较低, 无指示性作用, 当风化进入有显著组分流失的中后期时, 其指示作用较强。

对于风化程度较低的 A 组结构体, 从核心石到腐岩壳, 碱/倍半氧化物指数除了降低, 而且除 BA_4 外, 降低幅度都达到了 0.1(图 2-k), 因此, 这种指数变化应该不是岩石化学成分空间非均匀性造成的, 而应该是风化程度增高的显现。对于风化程度较高的 B 组结构体, 腐岩壳的碱/倍半氧化物指数均比核心石低, 风化程度最低的 X 处于最低水平(图 2-1), 其余 4 个样品按降幅从大到小的顺序为 K(1.39)、L1(1.35)、A(1.24)和 L2(1.05)。

碱/倍半氧化物指数对玄武岩风化程度的指示性要明显高于 BA_1 、 BA 、 BA_3 、 BA_2 和碱/铝指数, 无论对风化初期还是中后期的玄武岩, 其敏感性似乎均较高, 这应该与该系数中活动性组分和惰性组分的数目较多有关。一般而言, 随着风化程度的升高, 岩石中的 Na、K、Ca、Mg 含量越来越低, 但是, 对于风化的某一阶段, 不同元素的淋失程度可能是高度变化, 而不会是一致的或严格呈比例的, 因此, 将它们作为一个整体来考虑是合适的。同理, 惰性元素中综合考虑此类元素群体 $Fe_2O_3+Al_2O_3+TiO_2$ 要比采用其中之一更为全面。但是, 也正是由于不同元素淋失、富集的不一致性(incongruent), 这种做法很可能会低估某些元素的淋失程度, 也即岩石的风化程度。

文[2]中图 12、图 14 清晰表明, 对于 A 组结构体, 从核心石到腐岩壳, 碱/倍半氧化物指数分子中的 Na_2O 、 K_2O 、 MgO 和 CaO 及分母中的 Al_2O_3 和 TiO_2 均未发生系统降低和升高, 唯一出现有规律变化的是 Fe_2O_3 。因此, 碱/倍半氧化物在 A 组结构体核心石与腐岩壳的统一变化实质上是由 FeO 单调降低引起的 Fe_2O_3 同步增大(文[2]中图 14-e、f)控制的, 而由于比值中参数过多, 碱/倍半氧化物在一定程度上遏制了 Fe_2O_3 对岩石风化程度的表达。

综合图 1、图 2 所示 7 个风化指数对两组峨眉山玄武岩结构体风化程度的指示情况可以看出, 以组分绝对流失和相对富集为着眼点的风化指数一般仅适合于处于风化中后期的峨眉山玄武岩的风化程度判别, 而无法判定处于风化初期、但明显已经发生风化的玄武岩。碱/倍半氧化物指数与 A 组结构体的风化状况之间也存在较好的相关关系, 表明考虑活动性和惰性组分较多的 M/IM 类风化指数更为合理。但必须指出的是, 碱/倍半氧化物指数对 A 组结构体风化状况的较高敏感度实质上是由 Fe_2O_3 独立控制的。因此, 对于尚未发生明显组分淋失与富集

的风化初期玄武岩的风化程度判别,应充分考虑 Fe 的价态转变。

对于 A 组结构体,核心石的 7 个风化指数与新鲜玄武岩总体差别较小,表明它们的核心石仍处于基本新鲜的状态;除 BA、BA₂ 外,B 组结构体核心石的其余 5 个风化指数均明显小于新鲜玄武岩,说明该组结构体的核心石已经经历了较为明显的风化。

1.3 碱及碱土金属/主要组分 (M/(M+IM))

风化潜势指数 WPI (weathering potential index) 也以氧化物摩尔数比值方式表达,图 3 给出了 11 个玄武岩结构体从核心石到腐岩壳时 WPI 的变化情况。对于风化程度较低的 A 组结构体,从核心石到腐岩壳,WPI 有 4 个降低,2 个升高(图 3-a),WPI 对该组岩石风化程度的指示性不高。对于风化程度较高的 B 组结构体,腐岩壳的 WPI 均比核心石低,风化程度最低的 X 的 WPI 处于最低水平(图 3-b)。

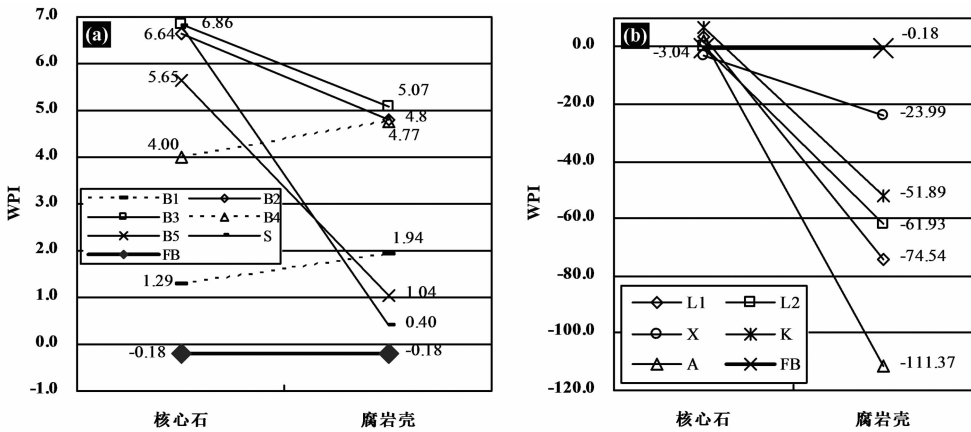


图 3 腐岩壳与核心石的 WPI 差异

Fig.3 WPT difference between basalt saprolitized crusts and corestones

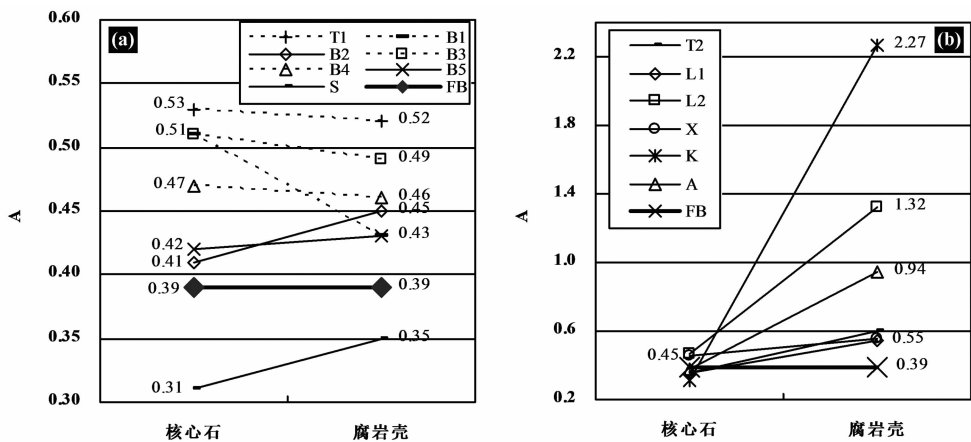


图 4 腐岩壳与核心石的 K₂O/Na₂O 差异

Fig.4 K₂O/Na₂O difference between basalt saprolitized crusts and corestones

程度较高的 B 组结构体,腐岩壳 A 均比核心石有所增大,但对比文[2]图 h、j 发现,除 X 结构体外,腐岩壳的 K_2O 和 Na_2O 均比核心石低,两者都发生了淋失,只是后者的衰减程度高于前者,A 值无法说明风化中后期的峨眉山玄武岩风化程度。

2 硅

硅酸盐岩风化过程中,Si 属活动性组分。尽管其活动性较弱,但由于其在母岩中所占的份额较高,其淋失行为易于显现。以 Si 为观察元素、以惰性组分为比较对象、以氧化物摩尔数比值表达的化学风化指数 SA、SF、Kr 和硅/倍半氧化物^[9],它们均属 M/IM 类,表达式分别为:

$$SA=SiO_2/Al_2O_3$$

$$SF=SiO_2/Fe_2O_3$$

$$Kr=SiO_2/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$$

$$\text{硅/倍半氧化物}=SiO_2/(Al_2O_3+Fe_2O_3+TiO_2)$$

图 5 集中给出了 13 个玄武岩结构体从核心石到腐岩壳时 4 个风化指数的变化情况。

对于风化程度较低的 A 组结构体,从核心石到腐岩壳,SA 未显现有规律变化,5 个降低、2 个升高,而且变幅均很小(图 5-a)。对比文[2]中表 2 可以看出,SA 的这种无规律变化应该主要与风化初期 Si 淋失、Al 富集均不明显有关。对于风化程度较高的 B 组结构体中,除 K 外,其余 5 个的腐岩壳 SA 均比核心石低,而这种变化应该是风化过程中 Si 淋失和 Al 富集引起的(图 5-b)。因此,SA 仅适合于风化中后期玄武岩的风化程度判别。

从核心石到腐岩壳,风化程度较低的 A 组结构体的 SF 出现了统一下降的趋势,其中 B4 变幅最小,S 变幅最大(图 5-c),SF 对风化程度的指示性似乎比较明显,但对比文[2]中图 14-a、f 发现,SF 的系统降低实际上是由 Fe_2O_3 的系统升高控制的, Fe_2O_3 对风化程度变化的敏感性明显高于 SiO_2 。对于风化程度较高的 B 组结构体,腐岩壳的 SF 均比核心石低(图 5-d),而这种变化是由 Si 淋失和 Fe_2O_3 富集共同引起的(文[2]中图 12-b 和图 14-f)。与 SA 类似,SF 也仅适合于风化中后期玄武岩的风化程度判别。

尽管从核心石到腐岩壳,Kr 在 A 组结构体中出现了统一下降的趋势(图 5-e),但由于 SiO_2 和 Al_2O_3 的变化是无规律的,Kr 的系统降低仍然是由 Fe_2O_3 控制的。对于风化程度较高的 B 组结构体,腐

岩壳 Kr 均比核心石低(图 5-f),而这种变化是由 Si 淋失和 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 富集共同引起的^[9]。与 SA、SF 类似,Kr 也仅适合于风化中后期玄武岩的风化程度判别。

文[2]中图 14-c 表明,A 组结构体从核心石到腐岩壳, TiO_2 含量并未出现有规律变化,因此,硅/倍半氧化物在该组结构体中出现的统一下降(图 5-g)同样是由 Fe_2O_3 的系统升高控制的。对于风化程度较高的 B 组结构体,腐岩壳的硅/倍半氧化物均比核心石低(图 5-h),而这种变化是由 Si 淋失和 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 TiO_2 相对富集共同引起的^[9]。因此,硅/倍半氧化物也仅适合于风化中后期玄武岩的风化程度判别。

综上所述,同属硅与惰性组分比值的 SA、SF、Kr 和硅/倍半氧化物不适合于风化初期而仅仅适合于风化中后期的玄武岩风化程度评价。对于风化中后期玄武岩风化程度评价,考虑惰性组分最多的硅/倍半氧化物更为合理。玄武岩风化初期及中后期, Fe_2O_3 含量随着风化程度升高而增大的趋势明显,应该成为风化程度评价需要考虑的重要因素。

3 铝

以 Al 为观察元素、代号分别为 B、 B_1 、CIW (Chemical Index of Weathering) 和 CIA (Chemical Index of Alteration) 的摩尔数比值形式的风化指数^[9]。

$$B=Al_2O_3/Fe_2O_3$$

$$B_1=Al_2O_3/TiO_2$$

$$CIW=100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + CaO)$$

$$CIA=100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO)$$

4 个风化指数中的前 2 个属于 IM/IM 类,后者属于 IM/(M+IM)类。图 6 集中给出了 13 个玄武岩结构体从核心石到腐岩壳时 4 个风化指数的变化情况。

对于风化程度较低的 A 组结构体,从核心石到腐岩壳,B 均有了不同程度的降低(图 6-a)。从文[2]中图 14-a、f 可以看出,从核心石到腐岩壳,7 个结构体的 Al_2O_3 没有出现有规律的变化,而且变幅很小,与前文的 SF、Kr 和 SR 类似,B 值的统一降低完全是 Fe_2O_3 控制的。风化程度较高的 B 组结构体腐岩壳的 B 值也均比核心石低(图 6-b),而这种降低仍然是由 Fe_2O_3 的大幅升高控制的,6 个结构体中有 4 的 Al_2O_3 出现了增大,而另外 2 个不升反降(文[2]图 14-a、f)。 Fe_2O_3 的大变幅抑制了 Al_2O_3 的无规律变

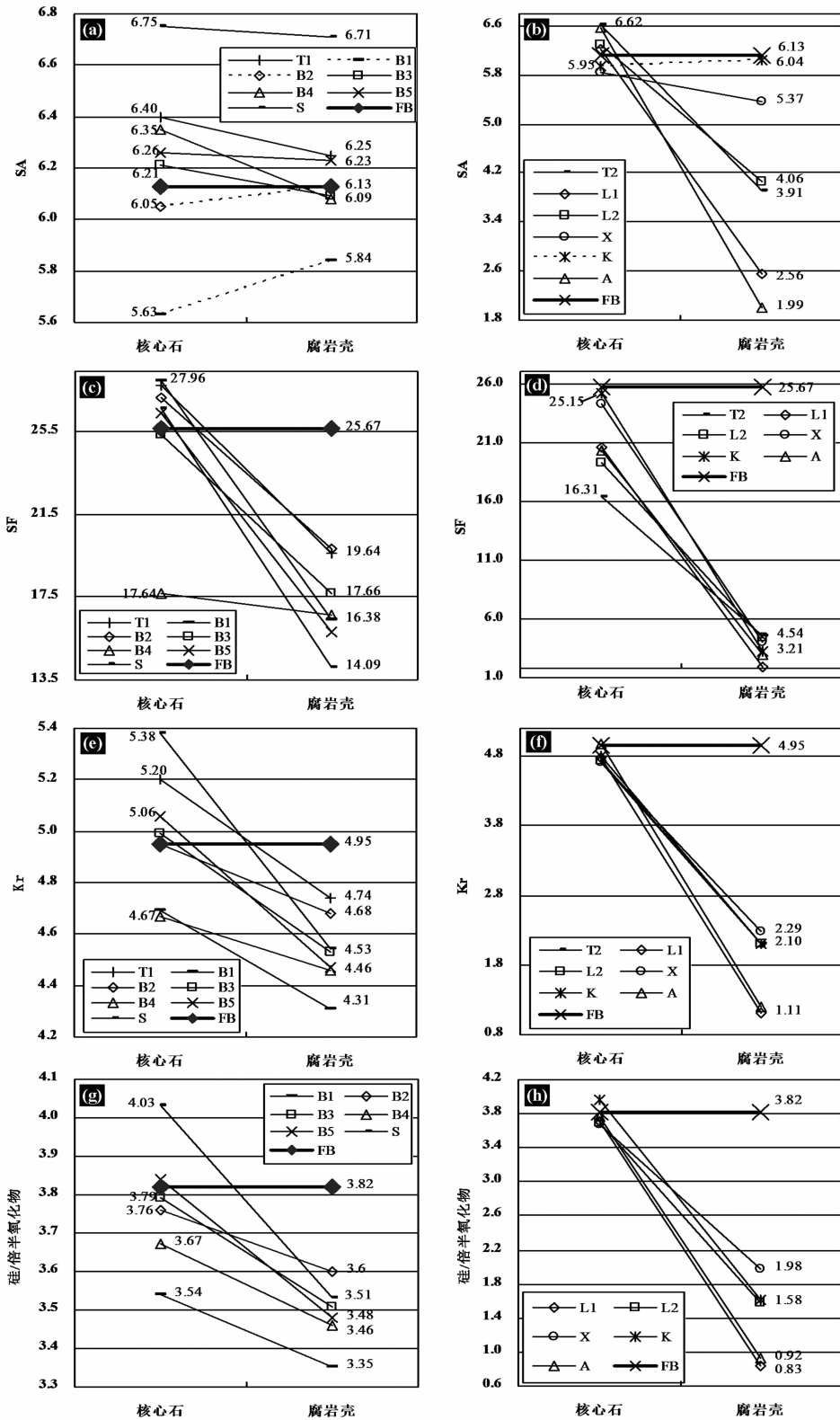


图 5 以硅为观察元素的风化指数与峨眉山玄武岩风化程度的关系

Fig.5 Variation in chemical weathering indices represented by Si with weathering grade of Emeishan basalt

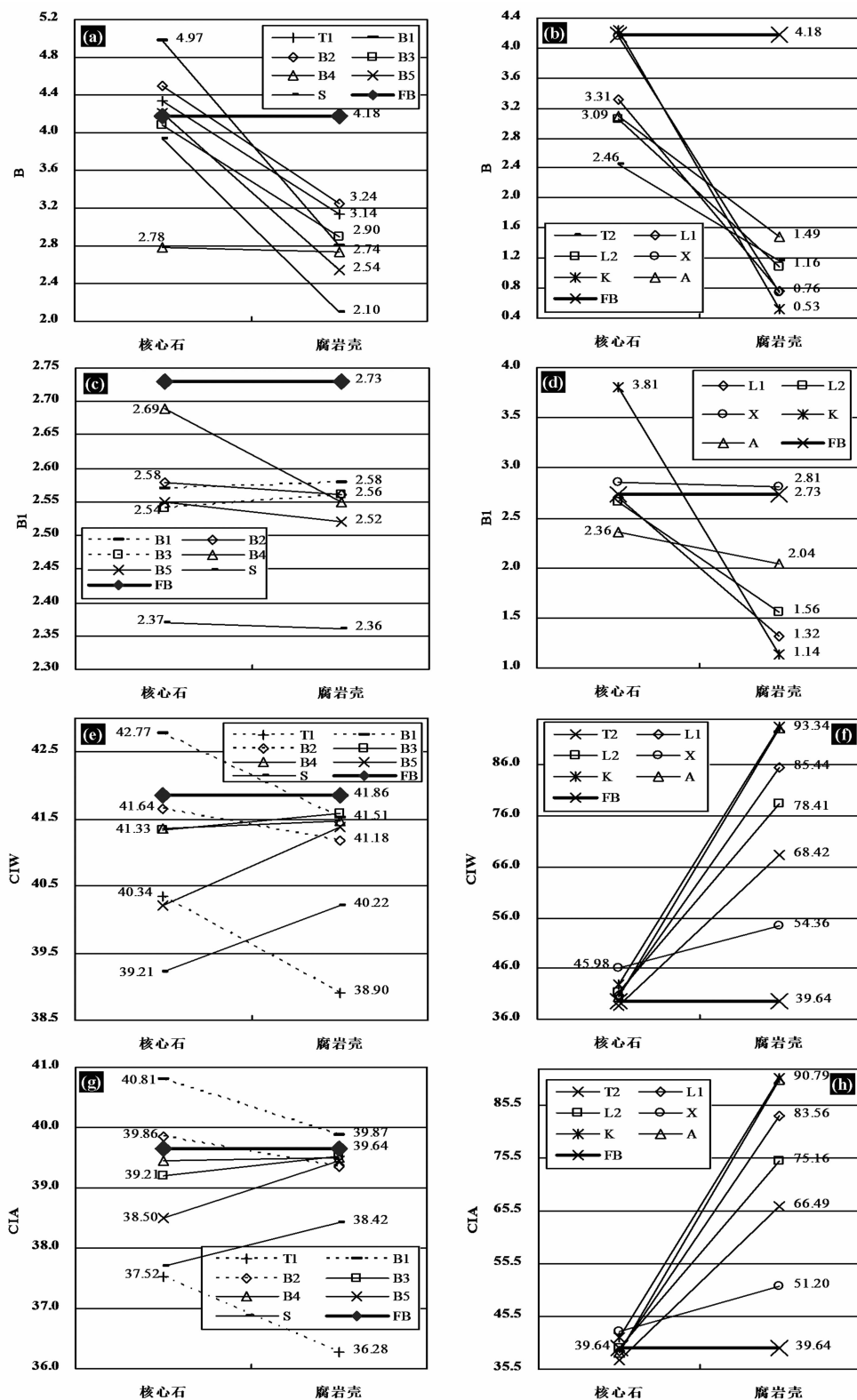


图6 以铝为观察元素的风化指数与峨眉山玄武岩风化程度的关系
 Fig.6 Variation in chemical weathering indices represented by Al with weathering grade of Emeishan basalt

化,使得 B 值一致减小。

用地球化学性质类似的 Al、Fe 的摩尔数比值作为风化指数是不合理的。由于 Al、Fe 在风化过程都是惰性的,而且不能准确判断他们的富集速率差异,因而很难判断两者的比值变化与风化程度的关系。13 个结构体的 B 值随着风化程度升高而降低的现象是由 Fe₂O₃ 含量的统一升高控制的,Fe₂O₃ 应该成为风化程度评价需要考虑的重要因素^[4]。

从 A 组结构体的核心石到腐岩壳, B₁ 没有出现有规律的变化,6 个结构体中 4 个降低,2 个升高(图 6-c),对比文[2]中图 14-a、c 可以发现,这是 Al₂O₃ 和 TiO₂ 无规律变化的结果。风化程度较高的 B 组结构体腐岩壳的 B₁ 值均比核心石低(图 6-d),但不能因此得出风化程度越高, B₁ 越低的结论,因为 Al 和 Ti 同属惰性元素,其相对含量都会随着风化程度的提高而升高,其比值降低只是两者淋失速率差异所致,而这种差异同样可能造成风化程度越高, B₁ 越大的现象。因此,用 Al、Ti 氧化物比值作为风化指数本身就是不合理的。

图 6-e、f 和图 6-g、h 分别给出了 13 个玄武岩结构体从核心石到腐岩壳时 CIW 和 CIA 的变化情况。对于风化程度较低的 A 组结构体,从核心石到腐岩壳, CIW 和 CIA 均有 4 个升高、3 个降低,没有出现有规律变化(图 6-e、图 6-g);对比文[2]中图 12 和图 14 可以看出,这是因为结构体风化程度较低,组分尚未发生系统变化的结果。风化程度较高的 B 组结构体腐岩壳的 CIW 和 CIA 均比核心石高(图 6-f、图 6-h),其中 X 变幅最小、A 变幅最大。

与前文大部分风化指数接近, CIW 和 CIA 所借助的也是岩石中惰性组分的富集程度和活性组分的淋失程度,随着风化程度的升高, CIW 和 CIA 增大,最终趋于 100%,但他们不适合于风化初期而仅适合风化中后期的风化程度判断。CIW 和 CIA 的表达式十分接近,只是后者的分母中多了一项 K₂O,而由于 K₂O 在玄武岩中的背景含量较低、在风化过程中的变幅往往不大,因此, CIW 略大于 CIA,但差异很小。CIW 似乎比 CIA 更为合理,因为风化中后期 K 元素易被风化产物吸附。

4 LOI

Irfan T Y(1996, 1999)^[5,6]认为烧失量(LOI)可以较好地指示火山岩和花岗质岩石的化学风化程度,但 LOI 与香港某滑坡酸性火山碎屑岩风化程度之间的相关关系很差^[1]。图 7 给出了 13 个玄武岩结构体从核心石到腐岩壳时 LOI 的变化情况。对于风化程度较低的 A 组结构体,从核心石到腐岩壳, LOI 有 5 个升高、2 个降低,没有出现一致性变化(图 7-a)。风化程度较高的其余 6 个结构体腐岩壳的 LOI 均比核心石高(图 7-b),其中 X 变幅最小、A 变幅最大。

当风化程度较低时, LOI 对风化程度的指示性较差,风化中后期,风化程度越高, LOI 越大。

5 结论

(1)在以碱及碱土金属为考察元素、以组分淋失为着眼点的 Parker 指数、BA₁、BA、BA₃、BA₂、碱/铝指

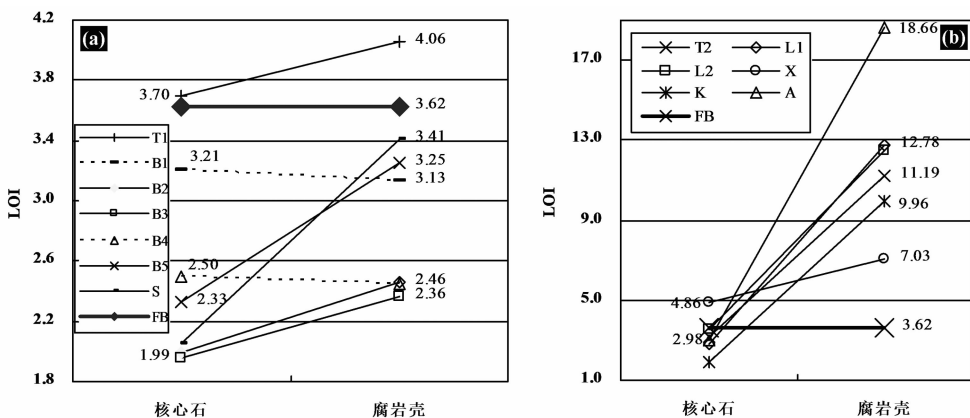


图 7 腐岩壳与核心石的 LOI 差异

Fig.7 LOI difference between basalt saprolitized crusts and corestones

数、碱/倍半氧化物指数及 WPI 不适合于风化初期而仅适合于风化中后期的峨眉山玄武岩风化程度评价,这主要与风化初期化学组分的淋失-聚集并不显著有关;对于风化中后期玄武岩风化程度评价,碱/铝指数和碱/倍半氧化物指数相对合理;以两种碱金属氧化物摩尔数比值形式表达的 A 值不能指示峨眉山玄武岩的风化程度。

对于风化初期玄武岩,尽管碱/倍半氧化物指数与风化程度之间出现了较好的相关性,但这种关系实质上是由 Fe_2O_3 独立控制的,而与组分的绝对淋失和相对富集无关。因此,严格说来,碱/倍半氧化物指数也不适合于风化初期的峨眉山玄武岩风化程度评价。

(2)以硅为考察元素,同属硅与惰性组分摩尔数比值的风化指数 SA、SF、Kr 及硅/倍半氧化物不适合于风化初期而仅适合于风化中后期的玄武岩风化程度评价;对于风化中后期的玄武岩风化程度评价,考虑惰性组分最多的硅/倍半氧化物相对合理。

(3)Al、Fe 及 Ti 均为惰性组分,加之无法准确判断他们在风化过程中的富集速率差异,三者之间的比值与风化程度之间应该不存在确定正相关或负相关关系,因而以铝为考察元素的 B 和 B_1 本身就存在明显的不合理性,不宜用于峨眉山玄武岩的风化程度评价。

以 Al 为考察元素的指数中,CIW 和 CIA 比 B 和 B_1 相对合理,但也只能用于风化中后期的玄武岩风化程度评价;考虑到风化晚期 K 易被吸附,CIW 比 CIA 更为合理。

(4)LOI 适合风化中后期而不适合于风化初期的玄武岩风化程度评价。

(5)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 5 个指数均出现了统一降低,而这一规律所以出现是因为这些指数的分母中所含 Fe_2O_3 的一致增大,而非其他组分的淋失或富集, Fe_2O_3 应该成为风化程度评价需要考虑的重要因素。

综上所述,前文讨论的 18 个风化指数均不适合

于风化初期的峨眉山玄武岩风化程度评价。能够指示风化中后期峨眉山玄武岩风化程度的指数包括 Parker 指数、 BA_1 、 BA 、 BA_3 、 BA_2 、碱/铝指数、碱/倍半氧化物指数、WPI、SA、SF、Kr、硅/倍半氧化物、CIW、CIA 及 LOI,其中更为合理的应该是碱/铝指数、碱/倍半氧化物指数和硅/倍半氧化物;指示性最差的是 A、B 和 B_1 ; Fe_2O_3 应该成为风化程度评价需要考虑的重要因素。

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、张家明、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] Duzgo ren -Aydin N S, Aydin A, Malpas J. Re -assessment of chemical weathering indices:Case study on pyroclastic rocks of Hong Kong [J]. Engineering Geology, 2002, 63:99-119.
- [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(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.
- [3] Parker A. An index of weathering for silicate rocks [J]. Geol. Mag., 1970, 10:501-504(in Chinese eith English abstract).
- [4] 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 eith English abstract).
- [5] Irfan T Y.mineralogy, fabric properties and classification of wenthened gronites in Hongkong [J]. Quart. J. Engng Geol., 1996, 29:5-35.
- [6] Irfan T Y. Characterization of weathered vollcanic rocks in Hong Kong[J]. Quart. J. Engng. Geol., 1999, 32:317-348.

The assessment of the weathering intensity of Emeishan basalt based on rock blocks(Ⅲ): Assessment of existing chemical weathering indices

XU Ze-min^{1,2}, HUANG Run-qiu²

(1. Department of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: The suitability of main weathering indices has been studied based on 13 weathered basalt blocks with core-shell structure from 7 rock mass sections in the core area of Emeishan basalt. Poor correlation has been observed between 18 chemical weathering indices and the early-stage weathering grade of the Emeishan basalt. The indices that can be used to evaluate mid-late period weathering degree of the Emeishan basalt include Parker's index, BA₁, BA, BA₃, BA₂, alkali/alumina ratio, alkali/R₂O₃ ratio, WPI, SA, SF, Kr, silicate/R₂O₃ ratio, CIW, CIA and LOI, in which, alkali/alumina ratio, alkali/R₂O₃ ratio and silicate/R₂O₃ ratio are more reasonable, while A, B and B1 are the worst. Fe₂O₃ that controls the alkali/R₂O₃ ratio, SF, Kr and silicate/R₂O₃ ratio in the initial weathering stage of Emeishan basalt should be regarded as an important factor to evaluate the weathering degree of Emeishan basalt.

Key words: Emeishan basalt; weathering degree; chemical weathering index; suitability

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