

# 吉林南部震旦纪万隆组与八道江组之间风化壳的发现

刘燕学<sup>1</sup>, 蔡国印<sup>2</sup>, 旷红伟<sup>3</sup>, 孟祥化<sup>4</sup>, 葛 铭<sup>4</sup>

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101;  
3. 长江大学, 湖北 荆州 434023; 4. 中国地质大学, 北京 100083)

**摘要:** 以往地质学家认为吉林省南部震旦纪万隆组与上覆八道江组之间是整合接触。笔者经过野外考察和室内研究, 认为二者应为风化壳不整合接触关系。化学分析显示, 风化壳泥岩与下伏母岩白云质灰岩相比化学成分发生巨大变化, 粘土化矿物元素( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ )与CaO和LOI的淋失相反, 从13.57%增加到55.63%, 具明显的风化成土特征。化学蚀变系数(CIA)和质量迁移系数分析给出了相同的结果: CIA值达到了39.43%, Ca元素的质量迁移系数达到-0.97, 几乎全部淋失, 表明化学风化作用明显。综合研究表明, 该风化壳处于碳酸盐岩风化成土的第二阶段, 即母岩中“不溶物”在风化过程中逐步堆积形成残积土的阶段, 为二级层序界面。

**关键词:** 吉林省; 震旦系; 万隆组; 八道江组; 古风化壳; 碳酸盐岩; 不整合

中图分类号: P512.1<sup>+</sup>3; P539.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)01-0047-06

## The discovery of paleo-weathering crusts between Sinian Wanlong Formation and Badaojiang Formation in southern Jilin Province

LIU Yan\_xue<sup>1</sup>, CAI Guo\_yin<sup>2</sup>, KUANG Hong\_wei<sup>3</sup>, MENG Xiang\_hua<sup>4</sup> and GE Ming<sup>4</sup>

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Changjiang University, Jingzhou 434023, China; 4. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on field observations and indoor researches, the authors hold that there exists an unconformity between Sinian Wanlong Formation and Badaojiang Formation in southern Jilin, as evidenced by three paleo-weathering crusts discovered there. In the past, however, the contact was believed to be a conformity contact. Chemical analysis shows that there is a remarkable change of chemical components from base rocks to the paleo-weathering crust. Unlike CaO and LOI, the total amount of  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  of the weathering crusts has increased from 13.57% to 55.63%, suggesting the existence of an obvious formation process of paleosol. The variation of chemical index of alteration (CIA) and that of moving index of mass from the base rocks to the weathering crust show the same trend. CIA is up to 39.43%, whereas the moving index of mass of Ca is up to -0.97, implying that Ca component has been almost completely depleted. All the above analyses show that these weathering crusts belong to the second paleosol formation stage of carbonate rocks, i. e., they were developed by the accumulation of undissolved materials in base rocks and hence belong to the 2nd\_order sequence surface.

**Key words:** Jilin Province; Sinian; Wanlong Formation; Badaojiang Formation; paleo-weathering crust; carbonate; unconformity

收稿日期: 2004-06-09; 修订日期: 2004-10-27

基金项目: 国际地质对比计划委员会项目 IGCP447(SC/GEO/546/447); 国家自然科学基金资助项目(40172043); 科技部国家重点基础研究资助项目(001CB7 11002)

作者简介: 刘燕学(1964-), 男, 博士, 副研究员, 从事沉积学、地层学及区域地质研究。

在华北的中、新元古代沉积地层中多次出现古风化壳沉积(乔秀夫, 1976; 陈晋镛等, 1980; 赵澄林等, 1997; 李任伟, 2000)。吉林南部震旦系分布在通化—白山一带(图1), 从下到上可分为桥头组、万隆组、八道江组、青沟子组。桥头组为陆源碎屑沉积, 以石英砂岩为主; 万隆组以灰岩为主, 为中厚层泥晶灰岩、瘤状灰岩、薄层或纹层状泥晶灰岩夹少量粉砂质泥岩层; 八道江组发育各种叠层石灰岩; 青沟子组以黑色页岩和菱铁矿化白云岩为主。

近年来笔者重点对吉林南部通化市二道江剖面、白山市青沟子剖面 and 老岭剖面的原震旦系进行了深入、系统的沉积相和层序地层研究, 旨在进一步提高胶辽徐淮地区前寒武系研究水平, 并最终为解决我国南北方新元古代地层对比奠定扎实基础。研究中发现, 青沟子剖面万隆组与八道江组之间的泥岩可能为不整合接触, 并通过野外追索和室内化学分析得到了佐证。这一新的发现, 对重新认识吉林南部新元古代的古地理演化和进行区域地层对比增

加了新的地质资料。

## 1 野外特征

在野外观测中, 青沟子剖面万隆组上部为中缓坡沉积环境, 由中厚层的泥晶灰岩组成, 在其顶部与八道江组之间有3层风化壳(图2)。这3层风化壳均由下部的灰白色纹层状泥晶灰岩或粉屑灰岩, 上部的中厚层粉屑灰岩或砂屑灰岩和顶部的10~20cm厚的黄灰色古风化壳构成岩相序列。上覆八道江组底部浅黄色含燧石条带和结核的泥晶灰岩及叠层石灰岩组成岩相序列。风化壳表面呈破碎状, 风化后为浅黄灰色, 与其上下岩层均有显著的差异。新鲜面的古风化壳呈黄褐色, 易碎。

从野外观察分析, 万隆组上部为层理不发育的中厚层泥晶灰岩互层, 质纯, 含一定量的泥质物质, 为潮下相对静水环境的产物; 向上为含白云质的细砂屑灰岩与泥岩(风化壳)互层, 海水明显变浅; 再向

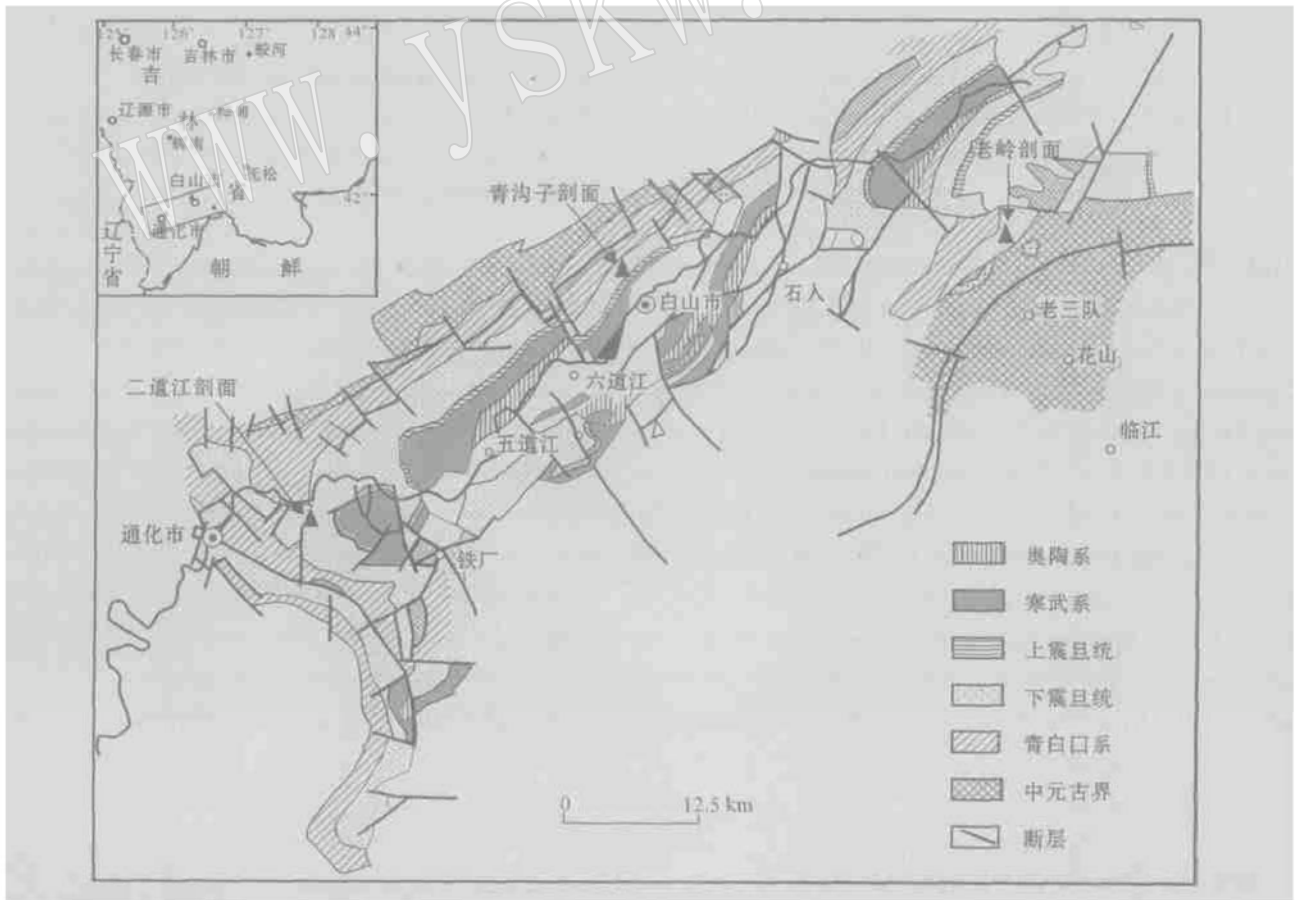


图1 吉林南部地质略图

Fig. 1 Geological map of southern Jilin Province



图 2 青沟子剖面万隆组与八道江组之间的风化壳

Fig. 2 The paleo-weathering crusts between Wanlong Formation and Badaojiang Formation in Qinggouzi section

上为八道江组浅黄色含燧石条带和结核的泥晶灰岩,具水平纹层,白云质含量较高,水体较浅。

区域上,老岭剖面八道江组底部为底砾岩沉积;二道江剖面万隆组和八道江组界线附近被第四系覆盖。因此,从岩层的发育来看,两组之间的泥岩可能为暴露环境风化的产物。

## 2 镜下特征

对采自吉林白山市青山湖青沟子剖面万隆组和八道江组之间风化壳岩石序列进行了镜下鉴定。其母岩和风化壳特征如下:

(1) 母岩:白云质灰岩,纹层比较明显,多数为方解石颗粒和少量小颗粒状的不透明黑色矿物,晶形为四方体,在日光灯的照射下,呈现明亮的黄色,为黄铁矿;基质主要为暗色泥质物质,基质支撑,钙质胶结,在泥质基质中夹杂有少量的白云石和石英颗粒。在最上部的一个序列中,下部的泥晶灰岩中白云石颗粒明显增多,反映海水逐渐变浅。

(2) 风化壳:钙质泥岩,基质为泥质物质,基质中夹粉晶级的方解石颗粒,颗粒边界不明显,周边已经被泥质物质溶蚀,但可见其晶形且数量较多,零散分布。存在一些形态各异的硅质分枝状条带和硅质

结核,其边缘清晰,明显突起。还见少量的黑色矿物,在日光灯的照射下,显深红色,可能为褐铁矿化黄铁矿。

## 3 地球化学特征

### 3.1 地球化学变化特征

在青沟子剖面万隆组和八道江组之间的 3 层连续的风化壳中,选择位于中部和上部风化壳的母岩和风化壳样品做了化学全分析,分析结果见表 1。

中部风化壳从母岩到风化壳主要元素的氧化物变化情况为:CaO 和挥发组分 LOI(CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O) 向上减少,其他元素氧化物包括 K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO、TiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 等向上相对增加。在母岩中 CaO、LOI 占了总量的 83.35%,而在风化壳中二者占总量的 64.05%。两者的差异主要是从母岩到风化壳有 Ca 等的大量淋失所致。

上部风化壳(以下简称 F3)从母岩到风化壳主要元素的氧化物变化情况为:CaO、MgO、LOI 向上减少,其他元素氧化物向上相对增加,特别是 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量有很大幅度的增加。在母岩中 CaO、MgO、LOI 占了总量的 72.94%,而在风化壳中却仅仅占总量的 35.20%,两者的差异主要是从母岩

表 1 青沟子剖面万隆组与八道江组之间风化壳的主要氧化物组成( $w_B/\%$ )及 CIA 数据

Table 1 Major oxide components and chemical index of alternation (CIA) of the paleo-weathering crusts between Wanlong Formation and Badaojiang Formation in Qinggouzi section

样品号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	CIA/%	岩石性质
Qw_b3F	41.44	0.61	14.29	0.43	3.64	0.03	7.58	9.61	3.90	0.13	0.19	13.23	4.78	39.43	上部风化壳
Qw_b2_3.2	20.52	0.14	3.79	0.36	1.14	0.04	13.99	23.67	0.57	0.08	0.06	33.08	2.20	7.95	上部母岩
Qw_b2F	15.67	0.21	4.02	0.49	1.05	0.04	13.16	27.18	0.63	0.14	0.07	34.93	1.94	9.22	中部风化壳
Qw_b2.2	11.90	0.09	1.67	0.36	0.11	0.02	1.85	45.60	0.21	0.04	0.01	36.25	1.50	1.98	中部母岩

由国家地质实验测试中心采用 X 荧光光谱法分析。

到风化壳 Ca、Mg 的大量淋失所致。

在整个风化壳剖面上, 元素的总变化趋势为(图 3): CaO 和 LOI 一直是减少的, 而且从母岩(Qw\_b2\_3.2)到风化壳(Qw\_b3F), CaO、LOI 有一个明显的减少过程。MgO 在此过程中先增加然后减少, 但其总体上还是增加的。其他元素氧化物向上都是增加的, 只是增加的幅度不同。粘土化矿物元素(SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)在整个剖面上的变化与难溶性元素化合物的变化趋势是一致的, 与 CaO 和 LOI 的淋失相反, 持续增加, 从 13.57% 增加到 55.63%, 显示出明显的风化成土过程。所有元素的变化情况都显示出 Qw\_b3F 的变化是最突出的。

### 3.2 古风化壳的化学蚀变系数分析

化学蚀变系数能够很好地反映风化壳所遭受化学风化的程度。据 Nesbitt 和 Young(1982), CIA 值的计算公式为:  $CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)$ , 其中各氧化物含量单位均为摩尔百分数, CaO 为扣除碳酸盐部分的值。

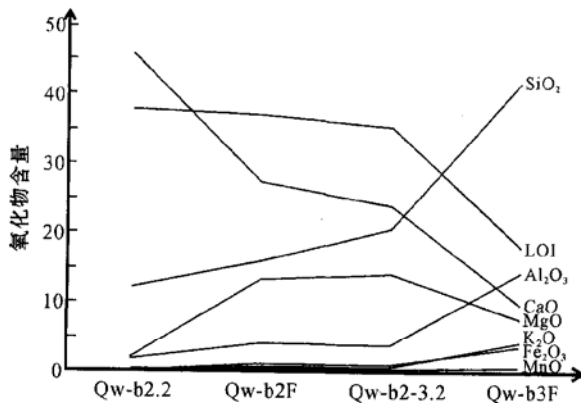


图 3 青沟子剖面万隆组与八道江组之间古风化壳化学成分变化曲线

Fig. 3 Chemical variations of the paleo-weathering crusts between Wanlong Formation and Badaojiang Formation in Qinggouzi section

元古宙古风化壳化学蚀变系数 CIA 值普遍较低, 多数为 30%~70%, 有的仅为 2%~3%。而显生宙古土壤的 CIA 值则普遍较高, 一般在 80% 左右, 甚至某些古土壤的 CIA 值达到 95% (王世杰等, 1999, 2002; 李瑞军, 2002)。这表明相对于显生宙, 元古宙的古气候趋向于比较干旱、炎热, 当时风化作用的主要因素是强烈的风力和水的侵蚀作用、高速的剥蚀作用和剥蚀区的夷平作用、大量的水分蒸发作用等。大部分古风化壳的形成主要是受物理和化学风化作用影响为主, 而生物对风化作用的影响很微弱。

从其化学蚀变系数(表 1)上可以看出, 古风化壳母岩的 CIA 值很小, 可见其化学风化作用微弱, 其数值与母岩中酸不溶物的存在有关。上部母岩岩石(Qw\_b2\_3.2)的 CIA 值为 7.95%, 与中部母岩(Qw\_b2.2)的 1.98% 相比, 遭到了一定程度的化学风化作用, 而在古风化壳(Qw\_b3F)上, 其 CIA 值达到了 39.43%, 可见其化学风化作用很明显。

### 3.3 古风化壳的质量迁移系数分析

元素变化曲线只能作为一种在岩石遭受风化过程中元素的相对变化及其变化趋势, 而质量迁移系数则能够比较真实地反映风化过程中元素的地球化学行为。

根据 Brimhall 和 Bietrich(1987), 某元素 j 在残积层的质量迁移系数  $\Gamma_{j,w}$  [即元素 j 在单位风化层体积( $m^3$ )中的质量迁移数] 可定义为:  $\Gamma_{j,w} = (C_{j,w} / C_{j,p}) / (C_{i,w} / C_{i,p}) - 1$ 。式中,  $C_{j,w}$  为 j 元素在残积层中的浓度;  $C_{j,p}$  为 j 元素在基岩中的浓度;  $C_{i,w}$  和  $C_{i,p}$  分别为不活动元素 i (参比元素) 在风化层和基岩中的浓度。  $\Gamma_{j,w} > 0$ , 说明元素 j 在取样点相对于原岩和不活动性元素 i 产生了富集或者有该元素的带入;  $\Gamma_{j,w} = 0$ , 说明该元素和元素 i 一样惰性, 没有发生淋失和富集;  $\Gamma_{j,w} < 0$ , 表示该元素在取样点遭受了淋失, 当  $\Gamma_{j,w} = -1$  时, 表明该元素已经完全淋

失。运用此式进行质量平衡计算的两个假设前提是: 一是风化了的原岩与下伏基岩基本相同; 二是不活性元素  $i$  为真正的惰性元素。如果风化壳样品均取自几乎直立的、仍保留层理结构的同一层中, 那么前提一则可以满足。

质量迁移系数中参比元素的选取非常重要, 一般在 Zr 和 Ti 之间选择(王世杰等, 2002), 本文选择元素 Ti。从质量迁移系数图(图 4)上可以看出, 相对于  $TiO_2$ , 氧化物  $Al_2O_3$ 、 $K_2O$ 、 $Fe_2O_3$  和  $P_2O_5$  在整个风化过程中一直处于递增状态。其他元素在古风化壳上都不同程度地遭到了淋失, 尤其是 CaO, 其质量迁移系数达到 -0.97, 几乎全部淋失(值为 -1 时为全部淋失)。可见当时曾遭受了很大程度的风化和剥蚀作用, 这与化学蚀变系数 CIA 是一致的。 $Fe_2O_3$  的增加以及 FeO 的减少说明, 从母岩到古风化壳转化的过程中, 由还原环境逐渐向氧化环境转变。在风化过程中, 多数情况下镁离子再次进入到沉积循环中, 而在  $CO_2$  存在的环境中, 在风化场所镁离子可当场沉积为菱镁矿( $MgCO_3$ )或白云石而保存下来。又因其在海水中比较容易沉积下来, 所以在陆地沉积的可能性相对减小; MgO 先增加然后又减少, 说明在此过程中, 白云石化作用增强, 海平面逐渐降低, 海水逐渐变浅, Mg 元素增加, 在暴露后, 遭受物理和化学风化作用, Mg 元素又逐渐被淋失。

Ca、Mg 和 Na 等易溶性元素的被淋失, 以及 Al 和 Fe 元素的富集, 说明当时处于暴露环境, 气候温暖潮湿, 利于元素的淋失和富集。而 Si 元素的被淋失, 说明当时为碱性环境。此处 P 元素的百分含量是研究区所有古风化壳中含量最高的。虽然 P 元素

在一定程度上能够表征生物活动, 但元古宙的生物主要为海生藻类, 很难对风化作用造成影响, 而且在样品薄片鉴定过程中也没有发现生物活动的迹象, 其富集可能是由于元素 P 容易与碳酸氢盐结合生成磷灰石而沉淀的缘故。

综上所述, 从母岩到风化壳的演化过程中, 化学成分变化有以下几个特点: ①CaO 等易溶成分发生了大量淋失; ② $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$  等难溶成分的含量有很大幅度的增加; ③代表氧化环境的  $Fe_2O_3$  在风化壳中的含量大幅增加, 表明风化壳形成时处于暴露氧化条件; ④MgO 总体上向上增加, 表明海水逐渐变浅, 白云石化作用增强, 完全暴露后有所淋失; ⑤ $K_2O$  在风化壳中的含量增加, 可能当时海水中 K 元素的含量较低, 水动力条件较弱, 风化程度相对较低; ⑥从图 3、图 4 和表 1 中岩石化学成分的变化中可以看出, 从下到上岩石的化学变化趋势增强, 风化程度增强。

## 4 讨论

从野外和室内研究推断, 青沟子剖面震旦纪万隆组和八道江组之间的泥岩为风化产物。

Sr、C 同位素是近年来才运用到前寒武纪地层测年的一种新方法。一般认为在同一个地质时期, 全球海水中 Sr 元素的比值是不变的, 而不同时期海水的 Sr 同位素比值不同。C 同位素地层学是依赖于这个事实, 即随时间的迁移, 海水 C 同位素比值主要反映有机质的纯埋葬速率。在世界各地的上前寒武系研究证明, Sr、C 同位素地层学相结合是全球前寒武系对比的有力工具。近几年, 世界各国地学工作者测定了大量的晚前寒武纪碳酸盐岩样品, 建立了较为可信的晚前寒武纪海水 Sr、C 同位素组成随时间变化曲线(Shields, 1999; 杨杰东, 2001)。笔者根据所测的 Sr、C 同位素数据与之比较, 并依据野外地层关系得出万隆组底部绝对年龄为 852Ma, 八道江组底部绝对年龄 812 Ma, 万隆组沉积年限应小于 40 Ma, 为一超旋回层序, 二者之间的风化壳为超旋回层序的界面。

原始岩石结构的破坏常伴有粘土矿物的形成、活动性元素钙、镁和钠等的淋失及稳定性元素硅、铝和正价铁等的富集。值得提出的一点是在元古宙古风化壳中, 钾元素是富集的, 而在显生宙的风化壳中, 钾元素则大都是被淋失减少的, 但也有增加的例

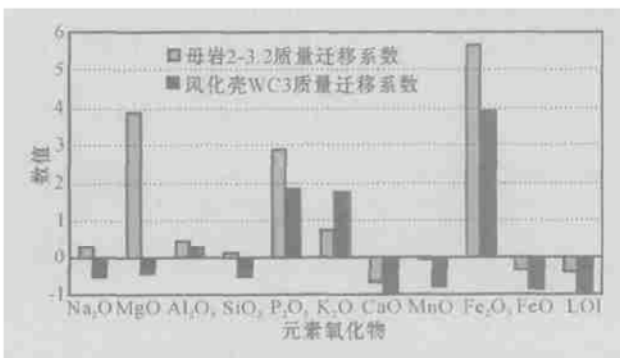


图 4 青沟子剖面万隆组顶部古风化壳的质量迁移系数

Fig. 4 The moving index of mass in the paleoweathering crusts between Wanlong Formation and Badaojiang Formation in Qinggouzi section

子,如高林志和乔秀夫(2001)发现的昌平组底部风化壳。

研究区风化壳的各种风化淋滤程度所显示的风化程度和阶段不尽相同, F2 比 F3 风化程度明显要低。同时从整个风化壳来看, 碱金属元素略有增加, 粘化程度一般, 基岩中“不溶物”在风化过程中逐步堆积形成残积土, 是碳酸盐岩风化成土的第二演化阶段(王世杰等, 1999), 总体反映了较低的风化壳发育阶段。

从风化壳的化学成分来看, 研究区内的风化壳富硅富铝富铁作用明显, 但铝的含量较少, 淋滤作用明显, 但不强烈, 说明地表水流动不畅和地下水埋藏较浅。

总的来说, 研究区风化壳的化学成分在垂向上的变化是清楚的, 有一定的淋滤作用, 处于碳酸盐岩风化壳演化的第二阶段。

该风化壳的确定, 对认识吉林南部震旦纪的地壳沉积环境演化具有重要意义, 并为胶辽徐淮前寒武纪地层的区域性对比增添了新的资料, 具有重要的地层学意义。

## References

- Brimhall G and Dietrich W E. 1987. Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, and strain in metamorphic hydrochemical systems: Results on weathering and pedogenesis[J]. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 51: 567~ 587.
- CHEN Jinbiao, ZHANG Huimin, ZHU Shixing, *et al.* 1980. Jixian Sinian Subgroup research[A]. Sinian Subgroup of China[C]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Publishing House, 55~ 109(in Chinese).
- GAO Linzhi and QIAO Xiufu. 2001. Cambrian Xiaweidian formation, A newly established formation in Western Hills, Beijing[J]. *Journal of Stratigraphy*, 25(3): 188~ 192 (in Chinese with English abstract).
- LI Renwei, CHEN Jinshi and CHEN Zhiming. 2000. Characteristics of the C and O isotopic compositions of carbonates in the weathering profile at the unconformable boundary between the Early Cambrian and Late Proterozoic in Ji County, North China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 35(1): 55~ 59 (in Chinese with English abstract).
- Nesbitt H W and Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motion inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299: 715~ 717.
- QIAO Xiufu. 1976. Investigation on stratigraphy of the Qingbaikou group of the Yanshan mountains, North China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 3: 246~ 265 (in Chinese with English abstract).
- Shields G A. 1999. Working towards a new stratigraphic calibration scheme for the Neoproterozoic- Cambrian[J]. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 92: 221~ 233.
- WANG Shijie, JI Hongbing, OUYANG Ziyuan. 1999. Preliminary study on weathering and pedogenesis of carbonate rock[J]. *Science in China(Series D)*, 42(6): 572~ 581 (in Chinese).
- WANG Shijie, SUN Chengxing, FENG Zhigang, *et al.* 2002. Mineralogical and geochemical characteristics of the limestone weathering profile in Jishou, Western Hunan Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 22(1): 19~ 29(in Chinese with English abstract).
- YANG Jiedong, ZHENG Wenwu, WANG Zongzhe, *et al.* 2001. Age determining of the Upper Precambrian System of Northern Jiangsu - Anhui by using Sr and C isotopes[J]. *Journal of Stratigraphy*, 25(1): 44~ 47(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Chenglin. 1997. *Meso-Neoproterozoic Geology of Oil and Gas and Sedimentology in North China*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 陈晋镛, 张惠民, 朱世兴, 等. 1980. 蓟县震旦亚界研究[A]. 中国震旦亚界[C]. 天津: 天津科学技术出版社, 55~ 109.
- 高林志, 乔秀夫. 2001. 北京西山寒武系下韦甸组——一个新建议的组[J]. *地层学杂志*, 25(3): 188~ 192.
- 李任伟, 陈锦石, 陈志明. 2000. 蓟县早寒武-新元古代不整合界面风化壳碳酸盐碳、氧同位素组成特征[J]. *地质科学*, 35(1): 55~ 59.
- 李瑞军. 2002. 冀南石炭-二叠纪古土壤特征及其在层序地层学中的应用(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国矿业大学.
- 乔秀夫. 1976. 青白口群地层学研究[J]. *地质科学*, 3: 246~ 265.
- 王世杰, 季宏兵, 欧阳自远. 1999. 碳酸盐风化成土的初步研究[J]. *中国科学(D辑)*, 29(9): 695~ 698.
- 王世杰, 孙承兴, 冯志刚, 等. 2002. 发育完整的灰岩风化壳矿物学与地球化学特征[J]. *矿物学报*, 22(1): 19~ 29.
- 杨杰东, 郑文武, 王宗哲, 等. 2001. Sr、C同位素对苏皖北部上寒武系时代的界定[J]. *地层学杂志*, 25(1): 44~ 47.
- 赵澄林. 1997. *华北中新元古界油气地质与沉积学*[M]. 北京: 地质出版社.