

# 广西合浦新屋面高岭石矿物学特征及其形成途径

瞿思思<sup>1a,2</sup>, 周汉文<sup>1b</sup>, 钟增球<sup>1a</sup>, 王锦荣<sup>1a</sup>, 柳婷<sup>1a</sup>

(1. 中国地质大学 a. 地球科学学院; b. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 长沙矿冶研究院, 长沙 410012)

**摘要:**在野外实地考察的基础上,结合X射线衍射、扫描电镜(SEM)、化学成分分析等测试技术,对广西合浦新屋面高岭土矿床的风化物进行了研究。X射线衍射分析表明,黏土矿物主要为高岭石、伊利石、石英、正长石及斜长石。高岭石结晶度在0.489~1.210之间,随着深度的逐渐减小,高岭石逐渐增多,长石逐渐减少,高岭石的结晶程度则呈现变好的趋势,反映出花岗岩中原生矿物高岭土化程度逐渐加强。SEM结果表明,随着风化程度的加强,高岭石发育越来越好,晶形越来越完整。化学成分分析显示 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和 $w(\text{K}_2\text{O})$ 互为消长关系,且随着深度的增大, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 逐渐减少, $\text{K}_2\text{O}$ 逐渐增多。该区长石蚀变为高岭土,可以经由绢云母中间阶段再转变成高岭石和直接转变成高岭石这两个途径。

**关键词:**广西合浦; 高岭石; 钾长石; 矿物学; 形成途径

中图分类号: P578.964

文献标志码: A

文章编号: 1000-7849(2010)05-0009-06

在我国东南沿海诸省,高岭土分布十分广泛。广西探明的高岭土资源约4.5亿t,居全国第2位,绝大部分分布在合浦县<sup>[1]</sup>。虽然对由那车垌花岗岩风化形成的十字路、清水江、耀康、新屋面等大型高岭土矿床大多已进行了勘查<sup>[2]</sup>,但前人的研究主要集中在工业应用方面,如矿石的品级、工业用途<sup>[3-4]</sup>等,在矿物学方面仍缺乏深入的研究,仅张实等<sup>[5]</sup>对风化过程中长石向高岭石转变的动力学机制进行了讨论,初步建立了高岭石形成长石的动态转化模型,认为高岭石除了结晶生长外,还可以由长石蚀变而成。为深入探讨高岭石的形成过程,笔者拟从矿物学的角度对新屋面矿区高岭土矿床中的高岭石进行系统研究。以广西合浦地区新屋面矿区风化剖面的高岭土钻孔样为样品,在提纯处理的基础上进行X射线衍射、扫描电镜和热分析研究,对广西合浦新屋面矿区高岭石的矿物学特征及其形成过程进行探讨。

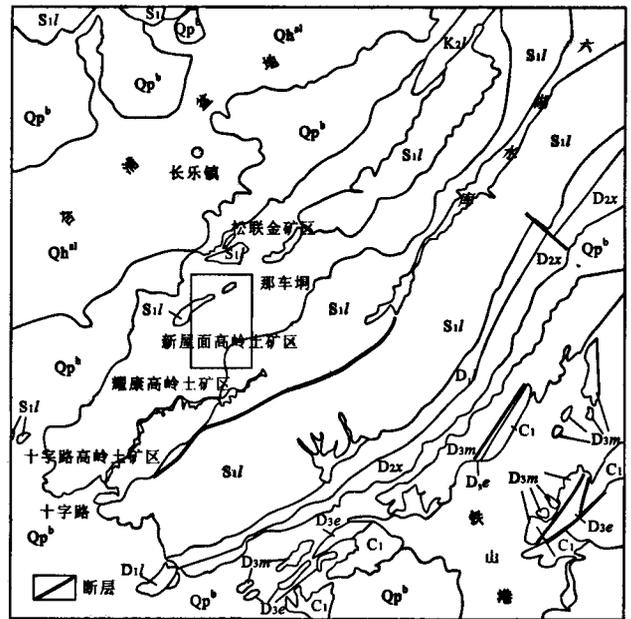


图1 广西合浦新屋面高岭土矿床地质简图

Fig. 1 Geologic sketch map of Xinwumian kaolin deposit in Hepu, Guangxi

## 1 矿区地质背景

新屋面高岭土矿区(图1)位于合浦县城北东75°方向,在区域构造位置上属于广西南华准地台云开台隆、钦州残余地槽和北部湾坳陷3个构造单元的相接部位。以博白—岑溪深断裂为界,北西为钦州残余地槽区,构造线为近东西向;南东属云开台隆构造区,构造线为北东向。矿区内出露的地层以第四系为主,下志留统连滩组零星分布,次为泥盆系、

S1l. 下志留统灵山群连滩组; Qp<sup>b</sup>. 中更新统北海组; Qh<sup>nl</sup>. 全新统; K2l. 上白垩统罗文组; D1l. 下泥盆统莲花山组; D2x. 中泥盆统信都组; D3e. 上泥盆统额头村组; D3m. 上泥盆统帽子峰组; C1. 下石炭统。

石炭系、白垩系、古近系和新近系。出露的岩浆岩为加里东晚期那车垌钾长石花岗岩岩体的一部分,属其南西段边缘,是高岭土矿床的成矿母岩<sup>[3]</sup>。矿区

收稿日期: 2009-12-25

编辑: 刘江霞

基金项目: 广东省教育部产学研结合重点项目(2007A090302055)

作者简介: 瞿思思(1986—),女,现攻读矿物学、岩石学、矿床学专业硕士学位,主要从事矿物学研究。E-mail: horizoncc@vip.qq.com

通讯作者: 周汉文(1964—),男,教授,主要从事前寒武纪地质及变质地质学、晶体结构等教学和科研。E-mail: hwzhou@cug.edu.cn

内岩石蚀变质作用较发育,主要为高岭石化,次为硅化、绢云母化、白云母化等。风化作用是本高岭石矿床的主要成矿机理,风化壳剖面具明显分带性,从上至下风化作用由强变弱,往下为新鲜基岩。风化带的顶底界面呈波状起伏,往往在地形较高处风化壳较厚,在低洼处较薄,体现了花岗岩岩体风化的不均一性。笔者选取风化带较明显的钻孔 ZK6326 (横坐标  $x$  648 781.117 m;纵坐标  $y$  2 409 531.924 m)沿垂直方向进行等距离取样,取样由浅入深编号依次为 6326-1 至 6326-17。

## 2 高岭石矿物学特征

### 2.1 X 射线粉晶衍射特征

样品分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的 X 射线粉晶衍射实验室采用 D/MAX3B 粉晶衍射仪完成,分析条件如下:靶为 Cu;管电压/电流为 30 kV/30 mA;滤波片为 Ni;狭缝为 0.15 mm;扫描速度为  $2\theta/\text{min}=4^\circ$ 。测试结果见图 2。

在 X 射线衍射谱图中,0.710 nm 和 3.580 nm 处出现很强衍射峰,表明样品中含有大量的高岭石;1.0,0.5,0.333 nm 处均出现较强衍射峰,说明样品中含有较多伊利石;0.425,0.333 nm 处出现衍射峰,表明样品中含有石英;0.324 nm 和 0.319 nm 处的衍射峰分别指示了正长石和斜长石的存在;样品 6326-8~17 在 0.324 nm 处出现衍射峰,说明含有钾长石;0.111 nm 衍射峰的出现,说明样品中可能含有伊/蒙有序混层矿物<sup>[6]</sup>。综合高岭石样品的 X 射线分析结果(图 2)可以看出,该高岭土矿床的矿物组合基本相同,主要为高岭石、伊利石、石英、正长石及斜长石等,仅少数几个样品中含有钾长石以及少量伊/蒙混层矿物<sup>[7]</sup>。这些矿物组合特征说明该矿区在风化过程中处于一个比较稳定的、温暖潮湿的环境<sup>[8-10]</sup>。

从图 2 中可以看出,随着深度的逐渐减小,高岭石矿物逐渐增多,长石类矿物逐渐减少,二者互为消长关系。根据 X 射线衍射图谱和高岭石亨氏结晶指数公式<sup>[11-12]</sup>算出,高岭石亨氏结晶指数(HI)为 0.489~1.210(如图 3 所示),结晶程度中等。从地

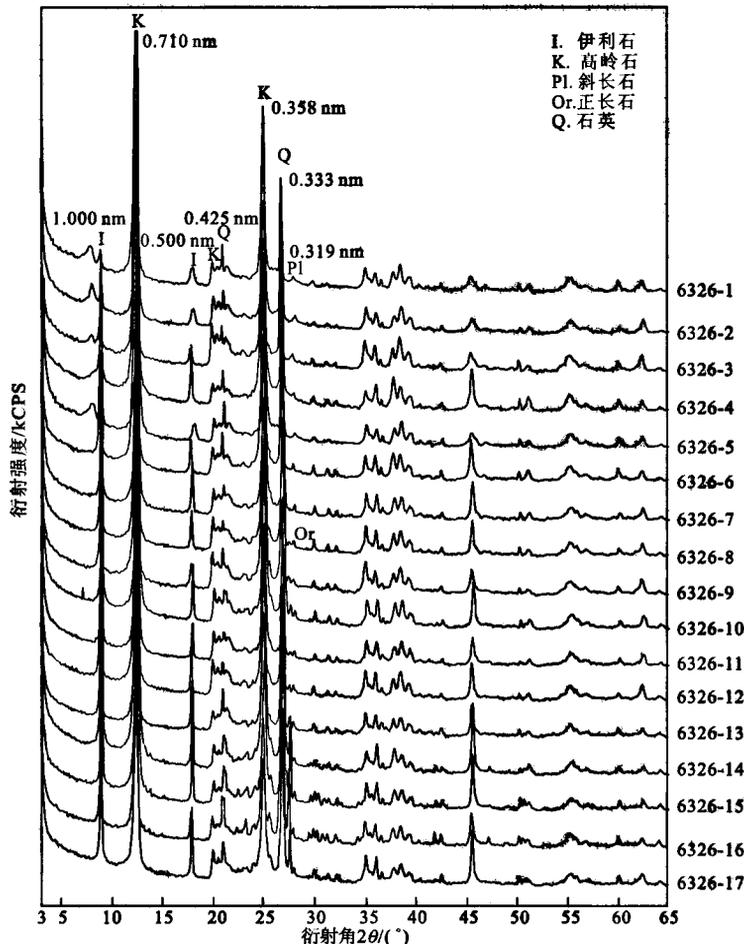


图 2 新屋面高岭土矿的 X 射线衍射谱图

Fig. 2 Diagram of X-diffraction spectrum of the kaolin samples from Xinwumian deposit

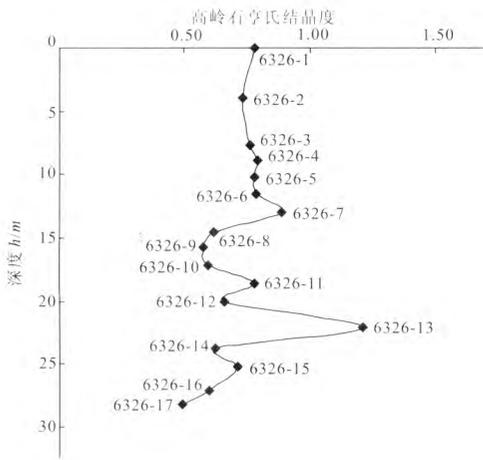


图 3 ZK6326 高岭石结晶度变化趋势图

Fig. 3 Trend of ZK6326 kaolinite crystallinity

表到基岩,高岭石结晶程度随其风化剖面位置不同而呈阶段性变化,整体呈下降的趋势,随深度的增加,结晶程度变低。其中样品 6326-7,6326-13 的结晶度偏离整体变化趋势,可能是气候、风化程度或下渗溶液活动性的短暂变化,使其结晶度发生异常。

### 2.2 扫描电镜特征

实验在武汉理工大学材料测试中心使用 JSM-5610 型扫描电子显微镜完成,加速电压为 20 kV,束流大小为 1~3 μA。具体测试条件如图 4 所示。

在扫描电镜下可以观察到花岗岩风化残积成因的高岭土晶形发育过程的一些变化<sup>[13-14]</sup>。其中 6326-17(图 4-F)为微风化带样品,其晶形发育很不完善,为似六方块状的雏晶<sup>[15]</sup>,集体呈浑圆状,破

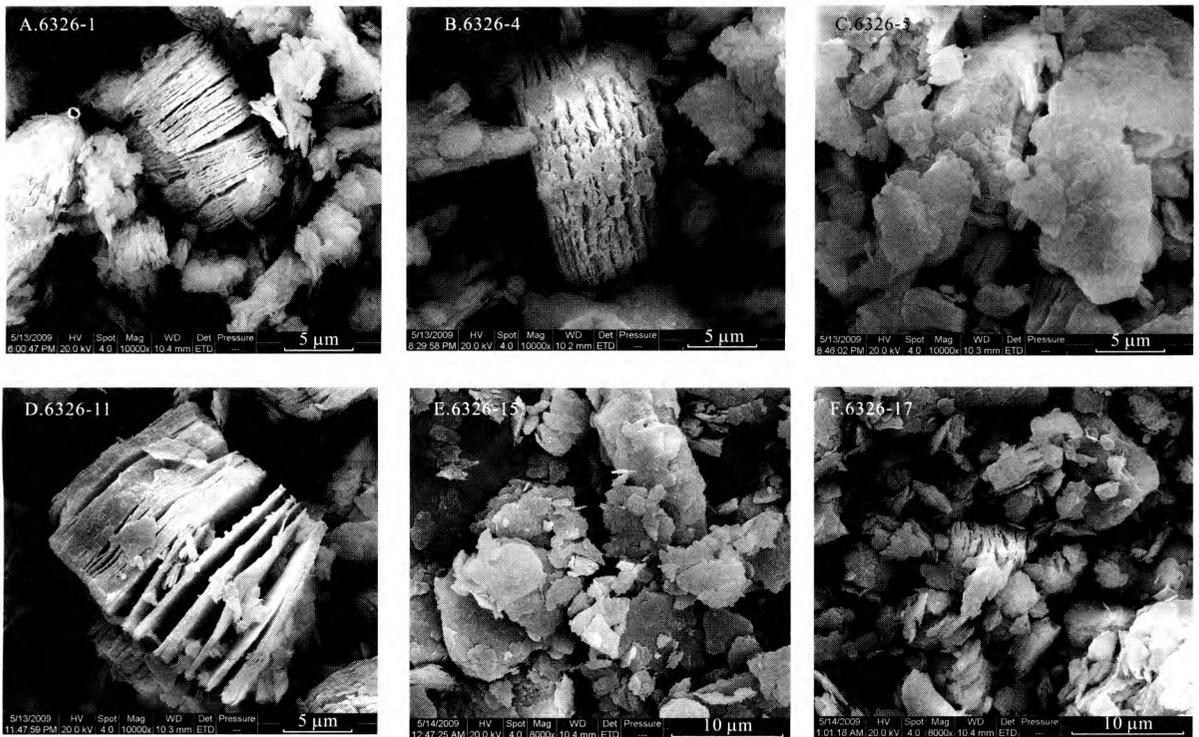


图 4 新屋面高岭土矿样的扫描电镜图像

Fig. 4 SEM images of the kaolin samples from Xinwumian deposit

碎严重。随着风化程度的加深,样品的形貌也发生了变化,如 6326-11,6326-15(图 4-D,E)为发育不完全的假六方片状高岭石集合体,并沿(001)面开始剥离开,其板片尚未完全分开,至 6326-4,6326-5(图 4-B,C),高岭石集合体发育较完整,多呈假六方片状,部分呈书册状。随着深度的逐渐变浅,即风化程度的加深,晶形越来越完整,发育越来越好(6326-1)(图 4-A),晶体呈假六方片状,厚度均匀,自形程度较好,晶片较大,约 10 μm,其集合体紧密堆积呈书册状、蠕虫状,保留了长石形貌。从图 4 可以看出,

从基岩往地表(埋深由深到浅),高岭石晶形越来越完整。

### 2.3 化学成分特征

化学成分测试在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质教育部重点实验室使用 XRF-1800 波长扫描 X 射线荧光光谱仪完成,测试条件:X 光管靶材为 Rh 靶,测试功率为 2 500 W(50 kV~50 mA),光栏为 30 mm,仪器恒温为 35℃。化学分析结果见表 1。

由表 1 可以看出,17 个样品的  $w(\text{SiO}_2)$  均稍高

表1 新屋面高岭土矿样的化学成分分析结果

Table 1 Chemical compositions of the kaolin samples from Xinwumian deposit

样号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	总量
6326-1	49.86	34.17	2.22	0.25	0.17	0.01	0.08	1.84	0.02	0.04	11.81	100.46
6326-2	49.98	33.65	2.88	0.29	0.13	0.01	0.11	2.81	0.02	0.05	11.28	100.58
6326-3	49.72	35.39	1.09	0.25	0.16	0.01	0.11	2.01	0.01	0.04	11.77	100.56
6326-4	49.98	35.01	1.29	0.21	0.18	0.01	0.10	2.06	0.01	0.05	11.50	100.41
6326-5	48.18	34.65	2.96	0.23	0.11	0.06	0.16	1.71	0.02	0.08	12.34	100.50
6326-6	49.59	34.86	1.81	0.28	0.13	0.01	0.09	2.22	0.02	0.04	11.48	100.54
6326-7	48.11	33.25	4.71	0.29	0.14	0.03	0.13	2.50	0.04	0.10	11.20	100.50
6326-8	49.90	34.26	2.56	0.26	0.14	0.06	0.09	2.70	0.04	0.10	10.97	101.08
6326-9	48.92	34.52	1.47	0.27	0.15	0.02	0.13	3.11	0.03	0.05	11.15	99.83
6326-10	50.22	34.54	1.15	0.25	0.15	0.01	0.10	3.19	0.05	0.05	10.81	100.51
6326-11	47.10	33.97	4.52	0.27	0.14	0.03	0.11	2.29	0.01	0.15	11.89	100.47
6326-12	47.86	34.49	3.37	0.29	0.14	0.01	0.12	2.34	0.01	0.15	11.72	100.53
6326-13	48.16	30.96	7.11	0.29	0.12	0.04	0.13	2.60	0.03	0.17	10.99	100.59
6326-14	51.37	33.03	1.34	0.31	0.14	0.01	0.11	4.06	0.05	0.04	10.01	100.48
6326-15	53.97	30.83	1.19	0.27	0.12	0.01	0.11	5.04	0.08	0.05	8.70	100.36
6326-16	54.17	30.37	1.33	0.25	0.15	0.08	0.14	5.07	0.09	0.06	8.71	100.42
6326-17	51.93	31.85	2.01	0.33	0.14	0.02	0.16	4.15	0.05	0.07	9.78	100.50

于高岭石的理论值(46.55%), $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 均稍低于高岭石的理论值(39.50%), $w(\text{TiO}_2)$ 均小于0.2%, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 均大于1%。从表中还可以看出, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和 $w(\text{K}_2\text{O})$ 互为消长,即随着深度的逐渐增大, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 逐渐减小, $w(\text{K}_2\text{O})$ 则越来越大,也说明随着深度的变化,高岭石和钾长石质量分数是互为消长的。

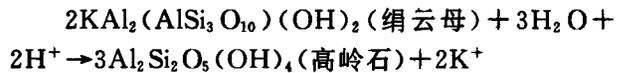
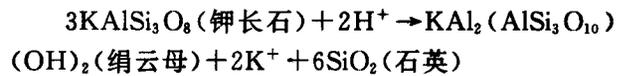
### 3 高岭石矿物的形成途径

广西合浦新屋面高岭土矿以高岭石为主,含少量其他黏土矿物,形成高岭石的母矿物主要为长石类矿物,由长石向高岭石的转化主要经过长石经绢云母中间阶段再转变成高岭石和长石直接转变成高岭石两个途径。

#### 3.1 长石经绢云母中间阶段再转变成高岭石

在合浦新屋面风化壳剖面的强风化带上部,长石矿物几乎全被高岭石、白云母、绢云母取代,基本没有长石残晶,普遍可见绢云母和高岭石共生的现象,在强风化带下部,逐渐出现长石残晶<sup>[2]</sup>,表明高岭石是长石经绢云母中间阶段变化而来的。扫描电镜下可见假六方片状的高岭石,其集合体呈书册状,并保留了长石形貌(图4-A)。据资料显示,区内为亚热带海洋性季风气候,常年温湿多雨,雨量充沛,年均气温22.35℃,年均降雨量1803.65mm,雨季主要集中在7、8、9月份,时有雷、暴雨<sup>[2]</sup>。充足的水分和温暖潮湿的气候有利于长石中K<sup>+</sup>等的迁出以及高岭石的形成和保存<sup>[8]</sup>。

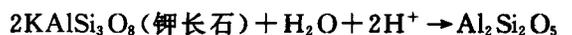
长石经绢云母中间阶段再形成高岭石的过程涉及到如下两个反应:



热力学研究表明:①当pH值一定时,温度越高,溶液中 $\lg c_{\text{K}^+}$ 就越小,有利于钾长石转化成绢云母以及绢云母向高岭石方向的转化;反之,温度降低, $\lg c_{\text{K}^+}$ 值增大,不利于反应向右进行。因此温度的升高有利于钾长石的转化和高岭石的形成。②钾长石转化成绢云母时要求介质的 $\lg c_{\text{K}^+}$ 值大于绢云母转化为高岭石时要求介质的 $\lg c_{\text{K}^+}$ 值,因此 $\lg c_{\text{K}^+}$ 值低有利于高岭石的形成。③当介质的 $\lg c_{\text{K}^+}$ 值一定时,温度越高,pH值就越低,有利于钾长石转化成绢云母及绢云母向高岭石方向的转化(图5)<sup>[16]</sup>。因此酸性的介质条件有利于钾长石的转化和高岭石的形成。这从理论上解释了以这种方式形成高岭石的可能性。

#### 3.2 长石直接转变成高岭石

由于在风化剖面的不同位置(由上到下)下渗溶液的活动性不同,且呈现阶段性的变化,所以在不同位置长石转化为高岭石的动态反应过程存在着差异。在风化剖面上,微风化带基本上保持了原岩的结构构造特征,岩石呈半松散的块状,在弱酸性介质环境下,长石类矿物部分开始水化向高岭石类矿物转变<sup>[2]</sup>。至弱风化带,长石已部分高岭石化,但未转化的钾长石常出现,故其矿物主要为高岭石和长石,而未见绢云母,此时显微镜下所观察到的高岭石呈规则的片状,并保留了长石斑晶假象,主要表现为长石直接水解而生成高岭石,其反应如下:



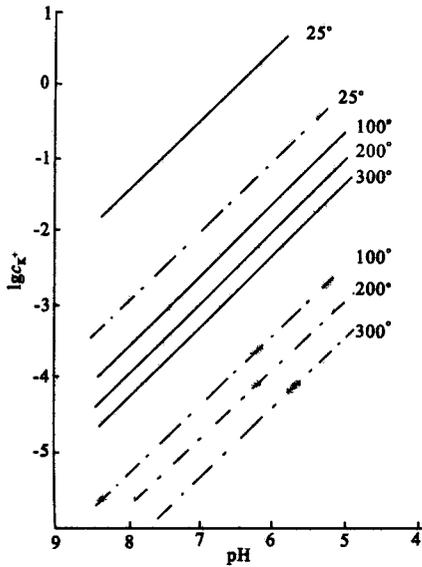
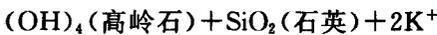


图5 长石经绢云母中间阶段再转变成高岭石的 pH—lg c<sub>K+</sub> 图解<sup>[16]</sup>

Fig. 5 pH—lg c<sub>K+</sub> diagram of the transformation of feldspar into kaolinite through sericite  
实线为长石转化成绢云母的 pH—lg c<sub>K+</sub> 对应关系;虚线为绢云母转化成高岭石的 pH—lg c<sub>K+</sub> 对应关系。



热力学研究表明:温度越高,pH 值越小及介质的 lg c<sub>K+</sub> 越小,越有利于钾长石直接转化成高岭石。当 pH=6~7,介质的 lg c<sub>K+</sub> = -0.2~-1.2 时,钾长石便直接转化成高岭石(pH=6~7 时,如 lg c<sub>K+</sub> = -0.3~+0.6,则钾长石先转化成绢云母,待 lg c<sub>K+</sub> 降至 -1~-2 时绢云母才向高岭石转化)(图 6)<sup>[16]</sup>。

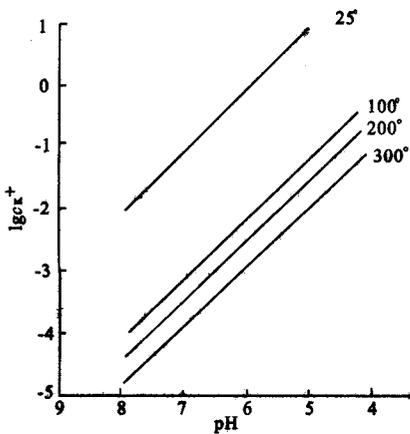


图6 长石直接转化形成高岭石的 pH—lg c<sub>K+</sub> 图解<sup>[16]</sup>

Fig. 6 pH—lg c<sub>K+</sub> diagram of the transformation of feldspar into kaolinite

## 4 结 论

(1)新屋面高岭土矿床黏土矿物组合比较单一,以高岭石为主,说明该矿区长期以来,温湿多雨,雨量充沛,一直处于比较稳定的温暖潮湿的环境。

(2)从地表到基岩,虽然高岭石结晶度变化整体呈下降趋势,但各结晶度变化并不大,且结晶程度并不是非常好,这与风化程度的差异有着很大的关系,也可能受到其他因素的影响,还有待更深入的研究。

(3)新屋面高岭土矿床长石向高岭石的转化主要是经过两个途径,一是钾长石经绢云母中间阶段再转变成高岭石,二是钾长石直接转变成高岭石。以何种方式形成与介质的温度、pH 值、阳离子种类及离子浓度有关。

### 参考文献:

- [1] 罗在明,韦灵敏. 广西优质高岭土的开发与展望[J]. 广西地质, 2002,15(1):11-14.
- [2] 张敏德,申强奇,苏正荣,等. 广西合浦县新屋面矿区高岭土矿详查地质报告[R]. 桂林:广西壮族自治区第三地质队,2006.
- [3] 王苑,周汉文,曾伟能,等. 广西合浦清水江高岭土矿的矿物学研究[J]. 地质科技情报,2008,27(1):42-45.
- [4] 尤振根. 国内外高岭土资源和市场现状及展望[J]. 非金属矿, 2005,28(增1):1-8.
- [5] 张实,张惠芬. 关于长石→高岭石动态形成过程的讨论[J]. 矿物学报,1992,12(4):374-379.
- [6] Varadachari C, Mukherjee G. Discriminat analysis of clay mineral compositions[J]. *Clays and Clay Minerals*, 2004, 52: 311-320.
- [7] 刘粤惠,刘平安. X 射线衍射分析原理与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2003:127-132.
- [8] 陈涛,王欢,张祖青,等. 黏土矿物对古气候指示作用浅析[J]. 岩石矿物学杂志,2003,22(4):416-420.
- [9] 汤艳杰,贾建业,谢先德. 黏土矿物的环境意义[J]. 地学前缘, 2002,9(2):337-344.
- [10] Murru M, Ferrara C, Da Pelo S, et al. The Palaeocene-Middle Eocene deposits of Sardinia (Italy) and their palaeoclimatic significance[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2003, 335(2): 227-238.
- [11] Range K J, Weiss A. Über das Verhalten von kaolinitit bei hohen Drücken[J]. *Ber. Deut. Keram. Ges.*, 1969, 46: 231-288.
- [12] Hinekey D N. Variability in crystallinity values among the kaolin deposits of the Coastal Plain of Georgia and South Carolina[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1963, 11: 229-235.
- [13] Keller W D. Kaolinization of feldspar as displayed in scanning electron micrographs geology[J]. *Geology*, 1978, 6(3): 184-188.
- [14] McD Whitaker J H. Diagenesis of the Brent sand formation: A scanning electron microscope study by W. Brian Whalley[J]. *Geo. Abstracts. Norwich, England*, 1987(2): 363-382.
- [15] Morad M, AlDahn A A. A SEM study of diagenetic kaolinitization and illitization of detrital feldspar in sandstones[J]. *Clay Mineral*, 1987, 22: 237-243.
- [16] 易发成,田煦. 高岭石矿物形成与稳定的热力学条件[J]. 建材地质, 1990(3): 8-14.

## Mineral Characteristics and Formation of Kaolinite in Xinwumian of Hepu, Guangxi

QU Si-si<sup>1a,2</sup>, ZHOU Han-wen<sup>1b</sup>, ZHONG Zeng-qiu<sup>1a</sup>, WANG Jin-rong<sup>1a</sup>, LIU Ting<sup>1a</sup>

(1a. Faculty of Earth Sciences; 1b. State Key Laboratory of Geological Process and  
Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, Changsha 410012, China)

**Abstract:** This paper presents the study of the weathering mineral of kaolinite deposit in Xinwumian of Hepu, Guangxi, based on field investigation and X-ray diffraction, SEM and chemical analysis. The result of X-ray diffraction shows that the clay mineral consists of kaolinite, illite, quartz, orthoclase and anorthose. The crystallinity of kaolinite is between 0.489 and 1.210. The kaolinite crystallinity tends to become better with the decreasing vertical depth, the gradual reduction of feldspar and the increase of kaolinite. This reflects the gradual strengthening of kaolinitation of primary minerals from granite. On the other hand, SEM images show the strengthening of weathering degree leads to the better growth of kaolinite and integrity of the crystal shape. While chemical analysis has revealed an alternative relation of growing and declining content of aluminium oxide and potassium oxide. With increase of the vertical depth, aluminium oxide declines gradually, while potassium oxide increases progressively. It is found that feldspar may be transformed into kaolinite either through an intermediate sericite stage or directly.

**Key words:** Hepu, Guangxi; kaolinite; k-feldspar; mineralogy; formation way

---