

中国凹凸棒石粘土矿床成因类型探讨*

周济元, 崔炳芳

(南京地质矿产研究所, 南京 210016)

摘要:我国的凹凸棒石粘土矿床发现较晚, 虽对矿床成因类型已有划分, 但由于划分依据不明确, 划分方案一直存在争议。本文通过分析我国凹凸棒石粘土矿床相关资料, 提出矿床成因类型划分的依据, 首次将我国凹凸棒石粘土矿床(点)的成因划分为沉积型、热液型和风化型三种类型及内陆湖泊火山—沉积亚型、内陆湖泊碎屑沉积亚型、内陆湖泊化学沉积亚型、海相沉积亚型、岩浆热液亚型、地下水热液亚型、构造动力变质热液亚型、混合热液亚型, 风化淋滤亚型和风化残积亚型等 10 种亚型。首次提出构造动力变质热液亚型, 对凹凸棒石粘土矿床的成矿理论研究和拓展找矿具有重要指导意义。

关键词:凹凸棒石粘土矿床; 成因; 类型; 亚型; 中国

中图分类号: P619.25

文献标识码: A

近几十年来, 包括中国在内的世界各地陆续发现了多处凹凸棒石粘土矿床(点), 提出不同的成因分类方案。在国外, 凹凸棒石粘土矿主要划分为沉积型和热液型^[1-4], 其中沉积型分为海相^[5-10]和陆相^[6, 11-12], 热液型未作进一步划分。我国学者在国外凹凸棒石粘土矿床成因分类的基础上, 对凹凸棒石粘土矿床成因提出一些分类, 如陈正国(1991)^[13]将我国凹凸棒石粘土矿床划分为玄武质火山岩成岩蚀变型、火山沉积型、内陆湖相沉积型、岩浆热液型和表生淋滤型 5 种成因类型; 郑自立等(1997)^[14]将我国凹凸棒石粘土矿床划分为火山区沉积型、火山风化型、火山蚀变交代型、陆相碎屑沉积型、湖盆化学沉积型、接触交代蚀变型和裂隙和溶洞充填型等 7 种成因类型; 陶维屏等(1994)^[15]提出凹凸棒石粘土矿床成因的 4 种类型等。可见, 凹凸棒石粘土矿床成因类型划分依据和方案不同, 存在一定争议。这些分类方案虽各有可取之处, 但也值得商榷。

为了促进凹凸棒石粘土矿床成矿理论的发展, 拓展凹凸棒石粘土矿床的找矿领域, 笔者根据现有地质矿产资料, 以矿床特征、成矿条件、控矿因素和成矿作用为划分矿床成因类型的依据, 首次将我国凹凸棒石粘土矿床成因划分为 3 种类型和 10 个亚

型, 提出较科学合理的、利于找矿的新矿床成因分类, 以供借鉴和参考。

1 凹凸棒石粘土矿床(点)的分布

我国自 1976 年在江苏六合县竹镇小盘山第三纪碱性橄榄玄武岩系粘土质沉积物的夹层中首次发现凹凸棒石^[16]以来, 在皖东—苏北接壤的呈北西西向分布的第三系玄武质火山—沉积断陷盆地中相继发现 30 多个凹凸棒石粘土矿床(点), 构成苏皖凹凸棒石粘土成矿带。我国北方和西北地区, 如河北涿鹿阳原, 山西天镇, 陕西宁强关口, 内蒙古察哈尔右翼前旗(兴和), 鄂尔多斯杭锦旗, 甘肃天水、张掖、白银, 青海湟中县西宁和新疆塔里木盆地第三系(含白垩系)陆源碎屑物中陆续发现了凹凸棒石粘土矿床(点); 西南地区, 如重庆奉节吐祥, 四川珙县和绵竹酿春池(侏罗系), 贵州大方、织金、纳雍、毕节、盘县、正安、黔西凹凸棒石粘土矿床(点), 云南镇雄、富源、宣威发现了凹凸棒石粘土矿床(点), 除绵竹酿春池外, 均赋存在二叠纪或三叠纪灰岩的层间、断裂或溶洞中; 中部地区, 如河南镇平, 湖北随州、江汉, 湖南浏阳(海泡石)凹凸棒石粘土矿床(点), 也在二叠系或三叠系灰岩层中产出; 山东青岛、江苏溧阳和安徽全椒在断裂破碎带、岩

* 收稿日期: 2014-08-21 改回日期: 2014-12-30 责任编辑: 汪建宁

第一作者简介: 周济元, 1936 年生, 男, 教授, 博导, 从事构造地质、地质力学、构造动力成岩成矿和非金属矿研究和开发应用等。

体与围岩接触带,安徽肥东龙山断裂带中也发现了凹凸棒石粘土矿床(点);江苏六合白土山、安徽广德玄武岩风化残积凹凸棒石粘土矿床(点)以及贵州大方残积浮土层及甘肃平凉灵台任家坡、庆阳西峰赵家川黄土—红粘土中的自生凹凸棒石等。

2 凹凸棒石粘土矿床(点)成因分类

根据现有地质矿产资料,以矿床特征、成矿条件、控矿因素和成矿作用为划分矿床成因类型的依据,结合找矿实际,将我国凹凸棒石粘土矿床成因划分为 3 种类型和 10 个亚型(表 1)。

2.1 沉积型

沉积型凹凸棒石粘土矿床(点)包括内陆湖泊火山—沉积亚型、内陆湖泊碎屑沉积亚型、内陆湖泊化学沉积亚型和海相沉积亚型,分述如下:

(1) 内陆湖泊火山—沉积亚型

矿层多产于火山喷发间歇期的粘土沉积层,凹凸棒石粘土呈土状,凹凸棒石含量较高,是目前我国最主要的凹凸棒石粘土矿床亚型,主要分布于苏皖凹凸棒石粘土成矿带,东起江苏金坛茅山,西至安徽明光一带,沿苏皖凹陷的次级六合方山—明光女山北西向西向断陷盆地分布。浅色岩系凹凸棒石粘土矿床如江苏六合白土山、小盘山,盱眙黄泥山、龙王山、雍小山,安徽明光官山、清明山等;红色岩系凹凸棒石粘土矿床如江苏金坛花山^[17]等,发育在内陆湖泊火山—沉积盆地,距火山口较近;成矿物质源于火山喷发玄武岩和火山碎屑岩的水解、水体搬运、结晶分异、淀积成矿。矿物组成除凹凸棒石外,还有石英、白云石、蒙脱石。该亚型具两种标志层,一是硅质蛋白石层,呈层状、似层状,与凹凸棒石粘土互层,蛋白石底部平整,界线清晰,顶部渐变为凹凸棒石;凹凸棒石粘土中发育硅质球、硅质团块,中心为硅质,向外渐变为凹凸棒石,白云石为自生或准同生,在硅质凹凸棒石粘土和碳酸盐凹凸棒石粘土间有岩性过渡带显示水下隆起或障壁;二是凹凸棒石粘土中含有半风化细小球粒状玄武岩残块,产有中华河狸、陆兔等化石和化石碎片,犀类化石包括同一个体犀类下颌骨和部分椎骨等^[18],表明为第三纪。

以江苏盱眙黄泥山凹凸棒石粘土矿床^[14]为例,该矿床位于苏皖凹凸棒石粘土成矿带西部,地层为第三系渐新统三垛组、中新统下草湾组及上新统桂五组。三垛组为泥质粉砂岩、粉砂岩和泥质碳酸盐岩;桂五组为碱性橄榄玄武岩间夹紫红色凝灰岩、火山沉积粘土岩组成;玄武岩为该区火山喷发第二旋回产物。下草湾组为玄武岩和沉积粘土岩、碳酸盐岩和风化粘土岩、火山碎屑岩组成,自上而下可分三

个韵律,其中第三韵律上部粘土层与该区第 V 层粘土相当。矿层由弱风化玄武岩、蒙脱石粘土岩、凹凸棒石粘土岩、含凹凸棒石蒙脱石粘土岩及晶屑凝灰岩组成。顶板为桂五组玄武岩,底板为气孔状、杏仁状玄武岩,其顶部强烈粘土化,与含矿层蒙脱石粘土岩呈过渡关系。蒙脱石粘土岩主要由蒙脱石、绿泥石、蛋白石、亚显微晶质 SiO_2 类组成。凹凸棒石粘土岩层为含矿层主体,由凹凸棒石粘土岩、硅质凹凸棒石粘土岩、硅质岩、白云石凹凸棒石粘土岩、含白云石凹凸棒石蒙脱石粘土岩及含凹凸棒石白云岩组成。沿水平方向岩性变化为矿区西部以前三种为主,呈似层状、透镜状,为与凹凸棒石粘土互层的硅质岩层。硅质岩层底部界线清晰,上部渐变为凹凸棒石粘土,缺乏碳酸盐岩,系典型沉积岩结构。矿区东部以白云石为主的后三种粘土岩组合,硅质岩层消失。凹凸棒石粘土岩层的矿石类型有凹凸棒石粘土、蒙脱石凹凸棒石粘土、硅质凹凸棒石粘土、白云石凹凸棒石粘土。该矿床在上新世下草湾期位火山沉积盆地边部,含矿层单层厚度小,硅质岩层与凹凸棒石粘土岩层频繁交替出现,白云石凹凸棒石粘土岩中见有近岸相凹凸棒石粘土碎屑的泥质碎屑结构和由较粗粒粘土砾屑略显定向排列的层理构造,含矿层上部蒙脱石粘土岩顶部的浅滩泥裂及网脉状粉红色蒙脱石脉等表明,凹凸棒石粘土岩形成于动荡的浅水环境。含矿层岩石组成、岩石的稀土元素地球化学特征表明,矿区凹凸棒石粘土岩层形成的主要物质来源于底板杏仁—气孔状碱性橄榄玄武岩、周围火山碎屑岩。可见,火山—沉积亚型凹凸棒石粘土矿床的成矿物质主要来源于底板杏仁—气孔状碱性橄榄玄武岩和周围火山碎屑岩。近岸相以胶体形式相对集中,火山碎屑和玄武岩遇水水解、溶解,随水运移、适宜环境结晶分异、淀积;远岸相白云石凹凸棒石粘土岩成矿物质,部分来自火山碎屑岩和玄武岩风化、水解、溶解,另一部分为近岸相或早期蒙脱石转化为凹凸棒石以及凹凸棒石粘土岩内碎屑物。水体为低热异常、盐度偏高的淡水—半咸水环境。成矿以自结晶作用为主、部分由蒙脱石转化。成矿过程为碱性橄榄玄武岩及其火山碎屑物空落于断陷盆地,经水解、溶解,析出 SiO_2 、 MgO 、 Al_2O_3 、 CaO 和 Fe_2O_3 等,随水运移。硅质凹凸棒石粘土岩形成于 SiO_2 - MgO - Al_2O_3 - Fe_2O_3 - H_2O 体系,碳酸盐凹凸棒石粘土岩形成 MgO - CaO - SiO_2 - Al_2O_3 - CO_2 - H_2O 体系。凹凸棒石、白云石等为自结晶产物,当水介质为碱性,水体中 $[\text{Mg}^{2+}]$ 、 $[\text{H}_4\text{SiO}_4]$ 活度因凹凸棒石和蛋白石晶出而变化时,将交替形成凹凸棒石粘土和晶质 SiO_2 。

表1 中国凹凸棒石粘土矿床成因类型及亚型

Table 1 Genesis types and subtypes of attapulgite clay deposits in China

成因类型	亚型	矿床特征	成矿环境	成矿作用	矿床(点)实例
沉积型	内陆湖泊火山一沉积	矿层在碱性玄武岩夹层中,呈层状、似层状和透镜状,矿石类型多,凹凸棒石含量变化大。	基性火山熔浆、火山碎屑空落于断陷盆地沉积。	基性火山岩、火山碎屑脱玻化、水解、溶解,凹凸棒石结晶、淀积或其它矿物(蒙脱石)转化形成。	江苏盱眙黄泥山、六合白土山南矿区、安徽明光官山、清明山。
	内陆湖泊碎屑沉积	矿层在由粗到细韵律碎屑岩层上部,呈厚层状,以蒙脱石为主,凹凸棒石、伊利石次之,伴生方解石、白云石。	湖盆周围成矿和碎屑(含火山)物质借助流水或风力搬运至浅水坳陷盆地沉积。	成矿(蒙脱石和伊利石)和碎屑物质成岩期或期后,富含Si、Mg溶液交代蒙脱石或结晶形成凹凸棒石和方解石。	山西天镇、内蒙察右前旗、杭锦旗,甘肃白银、张掖和河北阳原。
	内陆湖泊化学沉积	矿层呈层状、似层状,矿石由伊利石、蒙脱石、绿泥石、凹凸棒石、白云石、石膏、次生方解石、长石、石英组成。	来自湖盆周围的成矿物质,在内陆半咸化、咸化的封闭盆地沉积。	湖水中Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ 、Si ⁴⁺ 、Al ³⁺ 的活度高,凹凸棒石既可伴随蒙脱石、白云石(伊利石)晶出,又可由先成蒙脱石、白云石(伊利石)转化。	青海西宁、甘肃天水 and 湖北江汉、随州。
	海洋沉积	矿层在碳酸盐岩的泥灰岩段中,有风化、半风化和原岩型,矿石由海泡石、滑石、石英、方解石和凹凸棒石组成。	海洋碳酸盐台地沉积,也有深海底(水下600 m),在海沟附近,通常有火山物质。	凹凸棒石在浅海沉积,主要与海泡石、滑石伴生或转化;深海在沸石质粘土(斜发沸石、蒙脱石、伊利石)沉积物。	湖南浏阳、江西萍乐。
热液型	岩浆热液	矿体呈脉状、鸡窝状分布在绿帘石化安山质晶屑凝灰岩层间裂隙中,或中酸性岩体与镁质碳酸盐岩接触带,形成长纤维凹凸棒石。	(侵入或喷出)岩浆期或期后热液蚀变交代安山质晶屑凝灰岩或接触交代镁质碳酸盐岩。	岩浆期热液蚀变交代镁质碳酸盐岩或岩浆期后热液蚀变交代安山质晶屑凝灰岩,分离析出Mg、Al和Si进入溶液,运移至外接触带或层间裂隙中充填低温结晶形成长纤维凹凸棒石。	江苏溧阳、安徽全椒和山东青岛。
	地下水热液	矿体呈脉状、囊状,沿碎屑岩或碳酸盐岩裂隙或溶洞分布。	溶解成矿物质的热液,碳酸盐岩或碎屑岩的裂隙或溶洞。	含成矿物质的下渗雨水汇聚地下,热液充填于碎屑岩或碳酸盐岩的裂隙或溶洞低温结晶、淀积形成。	四川绵竹酿春池。
	构造动力变质热液	矿体呈脉状,沿脆韧性或韧性、剪性或压剪性断裂带分布。	剪性、压剪性断裂活动转化为动能、热能和化学能,岩石脆性、脆韧性、韧性变形、析水、元素活化、迁移,形成含矿热液。	在剪性、压剪性、脆性、脆韧性、韧性断裂活动过程中,富Si、Mg、Al的含矿热液迁移至低能量、低温部位聚集,碱性还原环境下凹凸棒石结晶、淀积。	安徽肥东龙山。
	混合热液	矿体呈脉状、囊状或似层状,沿裂隙、溶洞或层间裂隙分布。	溶解成矿物质的下渗雨水汇聚地下热液,碳酸盐岩或碎屑岩的裂隙或溶洞	含成矿物质的混合热液充填于碳酸盐岩或碎屑岩的裂隙或溶洞低温结晶出凹凸棒石,淀积形成。	贵州大方、重庆奉节、四川琪县。
风化型	风化残积	矿体呈似层状、脉状、囊状,沿玄武岩表面、夹层或碳酸盐岩、碎屑岩之上第四系浮土层及其裂隙分布。	湿热、雨水下渗、水解玄武岩、碳酸盐岩或碎屑岩中的成矿物质,在粘土层、风化残粒间、裂隙中分布。	含成矿物质的溶液在黏土层、风化残粒间及其裂隙中充填,常温常压下结晶、淀积。	江苏六合白土山Ⅲ号矿层、贵州大方残坡积浮土层。
	风化淋滤	矿体呈似层状、透镜状、囊状和脉状,沿玄武岩的表层、尖灭部位、底板顶部,以及碳酸盐岩和碎屑岩及其裂隙分布。	地下水由玄武岩或碳酸盐岩或碎屑岩层或裂隙表面向内淋滤、水解,形成碱性成矿溶液。	随地下水由岩层或裂隙表面向里淋滤、水解,形成含矿溶液,矿物依次晶出成蒙脱石凹凸棒石粘土;含矿溶液变化,SiO ₂ 、MgO增加蒙脱石转化为结晶较差的凹凸棒石,形成凹凸棒石粘土。	江苏盱眙黄泥山、龙王山,六合小盘山、白土山,安徽明光官山,贵州西南部、安徽广德。

(2) 内陆湖泊碎屑沉积亚型

该亚型凹凸棒石粘土矿床(点)主要分布于我国内蒙古、山西、河北和西北部的陕西、甘肃、新疆等省区,一般在古老变质岩或地层的基底之上覆盖的砂、砾、粉砂岩和粘土岩等组成的第三系或白垩系内陆湖泊碎屑沉积岩系,粘土岩层中的含矿层厚薄不同,凹凸棒石含量较低($<30\%$),分布广,厚度大,是我国重要的沉积矿床亚型,常与蒙脱石、伊利石、绿泥石等矿物组成含凹凸棒石蒙脱石粘土、含粉砂凹凸棒石蒙脱石粘土或含斜绿泥石凹凸棒石伊利石粘土等。矿石常呈红色、灰色,泥质结构,块状构造。

以甘肃靖远高湾乡白崖子凹凸棒石粘土矿床(点)为例,该矿床(点)出露于高湾乡李家井白崖子沙河两侧的沟谷中,矿体赋存于下第三系渐新统清水营组地层中,由红色碎屑岩夹不纯石膏组成,凹凸棒石与石膏共生,呈层状,近水平产出,矿体围岩为厚层状砂质泥岩夹粉砂岩、砂岩、石膏及透镜状灰岩。矿石主要为砖红色和深褐色,矿物成分差异较大。X射线衍射分析结果发现凹凸棒石为 26% ,石英为 40% ,长石为 11% ,方解石为 5% ,白云石为 3% ,石膏为 11% ,绿泥石为 2% ,部分样品凹凸棒石含量达 $50\% \sim 67\%$,伊利石 $8\% \sim 16\%$,高岭石 $8\% \sim 10\%$,石英和长石 $8\% \sim 25\%$,白云石 $2\% \sim 6\%$ 。电子显微镜下观察凹凸棒石呈纤维状、针状,集合体呈束状、网格状。以上矿床特征表明其成因为内陆半咸化湖泊碎屑沉积。

(3) 内陆湖泊化学沉积亚型

多见于我国白垩—第三纪内陆湖泊沉积盆地,如青海西宁盆地、甘肃天水盆地、河南镇平、陕西宁强、湖北随州、江汉盆地,含矿层主要由碳酸盐岩及少量碎屑岩组成,碳酸盐岩矿物主要为白云石,部分为石膏,是咸化—半咸化湖盆沉积。矿石主要由粘土矿物、碳酸盐矿物和少量碎屑物组成,粘土矿物主要有伊利石、蒙脱石、绿泥石和凹凸棒石;碳酸盐矿物主要有白云石和次生方解石;碎屑矿物有石英和长石。凹凸棒石呈针状、棒状、纤维状,局部呈舒缓“片状”集合体,纤维密集部位呈缠绕线团状。隐晶质白云石中的凹凸棒石呈粉粒状或土状,少数硬结块状凹凸棒石分布于微裂隙或白云石颗粒间。如湖北随州上第三纪隐晶质白云岩中的凹凸棒石^[19],凹凸棒石含量与白云石呈近正相关,与蒙脱石为负相关。

以青海湟中县西宁盆地凹凸棒石粘土矿床^[20]为例,该矿床位于中元古界浅变质岩系之上的西宁盆地近中心偏南,含凹凸棒石粘土岩产于新第三系

中新统吊沟组,上覆上新统临夏组,为砂砾岩、泥岩及泥灰岩;下伏为中新统谢家组,为棕红色粉砂质泥岩、砂砾岩夹泥膏岩。含凹凸棒石粘土岩,由互层状白色粘土质白云岩、灰绿色白云质粘土岩和棕褐色含白云石粘土岩组成。在灰绿色白云质粘土岩中含有大量脊椎动物化石。含矿岩层平缓,厚约 $4 \sim 7$ m,矿石矿物主要为伊利石、绿泥石、蒙脱石和凹凸棒石;碳酸盐岩矿物以白云石为主,方解石次之;碎屑物为石英和长石。

矿石化学成分、微量元素及同位素特征表明,富镁质粘土岩形成于内陆半咸水—咸水、低温、封闭盆地环境。凹凸棒石均匀分布于粘土岩中,颗粒间或微裂隙中呈胶体拉丝状和球状集合体,凹凸棒石纤维包裹白云石,蒙脱石、白云石类矿物转化为凹凸棒石等,反映在水介质中 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 、 Si^{4+} 、 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 等离子的活度高,凹凸棒石随水的温度、盐度、pH值变化,在 SiO_2 - MgO - Al_2O_3 - CaO - CO_2 - H_2O 体系中,先晶出白云石、蒙脱石、胶体状凹凸棒石等化学沉积,后富 Si^{4+} 、 Al^{3+} 、 Mg^{2+} 溶液对先成白云石、蒙脱石蚀变交代转化为凹凸棒石。

(4) 海洋沉积亚型

我国海相沉积型海泡石于1947年在江西乐平牯牛岭发现,据化学成分及脱色效果将“耐火白土”定名为海泡石。大规模地质找矿和勘查始于20世纪70年代末和80年代初^[20-21],目前已发现包括湖南浏阳永和海泡石矿床在内的数十个矿床(点),浏阳永和海泡石矿发现凹凸棒石^[22],故将该矿床称为凹凸棒石—海泡石粘土矿床。含矿层除下二叠统外,北方还有中元古界蓟县系雾迷山组^[23]。海相沉积型凹凸棒石—海泡石粘土矿床主要特点为含矿层位稳定,矿体呈层状、似层状;矿石中海泡石含量较低,凹凸棒石含量亦低;矿物成分以海泡石、滑石、凹凸棒石、石英、方解石为主。

以湖南浏阳凹凸棒石—海泡石矿床为例^[21],矿层赋存于二叠系下统栖霞组上部的钙镁质页岩、生物泥灰岩和泥晶灰岩中,顶板为下二叠统茅口组厚层状夹黑色燧石条带及团块状石灰岩,底板为栖霞组下部的钙镁质页岩、含燧石灰岩。矿层平面上呈面状,剖面上呈层状、似层状,产状与围岩基本一致,倾角 $5 \sim 20^\circ$,东西长约 6 km,南北宽约 $0.4 \sim 1.7$ km。矿石类型为原岩型和粘土型,原岩型含海泡石、凹凸棒石的生物泥灰岩、钙镁质页岩,呈灰黑色块状、微层理发育,断口粗糙,质地坚硬,矿物主要为海泡石、滑石、凹凸棒石、石英和泥晶方解石以及铁镁氧化物等。粘土型矿石在潮湿时为灰—深灰

色,干燥后呈灰白色、灰褐色,土状、页片状,弱丝绢光泽,质地细腻、有滑感,粘结性好,断口参差不齐。矿物主要由海泡石、凹凸棒石、石英和方解石组成。海泡石形成于“开阔广海陆棚,与陆棚“海水强烈搅动密切相关”^[7]。硫、锶同位素组成表明海泡石的物质组分来源于“广海沉积”;氢、氧同位素组成表明海泡石中的水“未保存原始海水”,而在成岩及其以后被“大气降水”替代;海泡石成岩变化主要为矿物相转变,随地质条件改变,由海泡石变为镁质蒙脱石(斯蒂文石)和滑石。笔者认为,在一定(Mg^{2+} 减少, Si^{4+} 、 Al^{3+} 增加)条件下转化为凹凸棒石。

2.2 热液型

热液型凹凸棒石粘土矿床(点)是泛指热液,包括岩浆热液、地下水热液、构造动力变质热液和混合热液等的作用下形成的矿床(点)。其亚型分述于下:

(1) 岩浆热液亚型

岩浆热液和火山热液均来自地壳及其以下岩浆期或岩浆期后的热液,故总称为岩浆热液。火山岩主要为火山熔岩和火山碎屑岩,经后期热液直接或间接转化形成纤维状凹凸棒石粘土矿床,通常伴生高岭石化等低温热液蚀变矿物。如江苏溧阳凹凸棒石粘土矿床(点),矿体产于溧阳盆地西缘的绿帘石化安山质晶屑凝灰岩的层间裂隙中,顶、底板均为粗安质晶屑凝灰岩。矿区岩石普遍绿帘石化,断裂带附近有叶腊石化、高岭石化、硅化和褐铁矿化等低温热液蚀变。凹凸棒石黏土脉长1.5~2.0 m,厚2~5.0 m。凹凸棒石集合体可分白色树皮状和黄白色朽木状,凹凸棒石纤维长,并垂直脉壁生长,其间夹有灰白色、肉红色大小不等的鳞片状蛋白石^[24]。

另一种岩浆热液型为接触交代蚀变指产在中酸性岩浆岩与镁质碳酸盐岩接触带的凹凸棒石粘土矿床(点)。该类矿床(点)很少构成工业矿床,并多伴生纤维状海泡石。凹凸棒石结晶度高,呈细长纤维。如安徽全椒马厂凹凸棒石粘土矿,矿体产于燕山早期中酸性杂岩体与新元古代陡山沱组和灯影组镁质大理岩的内外接触带^[25]。又如山东青岛发现一种貌似闪石石棉^[26],比重轻、纤维状,当地用作保温材料。X射线衍射分析和红外光谱分析检测认为,该矿物为热液蚀变产物,产于元古代中粒二长花岗岩与透辉石大理岩外接触带,矿体呈似层状或透镜状,与贵州等地坡缕石的X射线衍射谱线相似,表明为凹凸棒石。

(2) 地下水热液亚型

地下水热液亚型指雨水下渗、地下水、热卤水等

成矿作用形成的凹凸棒石粘土矿床(点),一般呈脉状、似层状,凹凸棒石含量高,规模小。四川绵竹酿春池温泉深达1560 m以上深井热矿水中发现的大量凹凸棒石^[27],该凹凸棒石富集于钙质砾岩的断层、裂隙中,测试分析和矿物学研究表明,绵竹酿春池可能具有两种矿石类型,是一种新的形成于地下深部粗碎屑岩裂隙中的低温热液凹凸棒石粘土矿,初步定为地下水热液充填交代型凹凸棒石粘土矿床中的大气降水深循环、低温热液裂隙充填型凹凸棒石矿床。

(3) 构造动力变质热液亚型

该亚型矿床(点)以热液充填裂隙形成凹凸棒石脉^[10-12],如安徽肥东县龙山安山质熔结凝灰岩中凹凸棒石断层岩^[28]。该亚型矿床(点)的主要特征是凹凸棒石产在断裂和裂隙中,并形成凹凸棒石脉或断层岩;矿物组成主要为凹凸棒石(含量>90%),次为石英和钠长石(含量<10%);矿物粒径极为细微,多为纳米—亚微米级;凹凸棒石纤维呈束状、定向排列,定向纤维局部显现弯曲,显示韧性变形;分散的凹凸棒石纤维表面光滑、平直,呈网格状分布。

参考相关资料^[28],结合笔者的认识^[29-35],以安徽肥东龙山凹凸棒石粘土矿床(点)为例。该矿床(点)位于安徽肥东县龙山一带,地层为下白垩统毛坦厂组,由玄武岩和安山质熔结凝灰岩以及火山集块岩夹层组成,属碱性玄武岩和碱性安山岩,前者K-Ar同位素年龄为 $119.2 \pm 2.3 \text{ Ma}$ ^[36]。该区为郟庐断裂带中南段,在断裂破碎带中大量出现白色凹凸棒石断层岩,断层中心呈带状薄层,产出部位为强烈压—剪性窄带,外侧为安山质熔结凝灰岩断层角砾岩;在强烈压—剪性宽带,局部未有凹凸棒石断层岩地段为安山质熔结凝灰岩质糜棱岩,凹凸棒石在断层内呈纤维状平行断层走向生长,在凹凸棒石断层岩内部及其与围岩之间有断层摩擦镜面和近水平擦痕等断层晚期或最后活动的痕迹;凹凸棒石断层岩除凹凸棒石外,局部还见红色安山质断层糜棱岩角砾混杂。在这些断裂破碎带中还有红色铁碧玉脉充填,最厚达几厘米,部分断层角砾岩也由铁碧玉胶结。断层带局部见孔雀石、绿帘石等热液蚀变矿物分布在铁碧玉岩脉和凹凸棒石断层岩的断裂破碎带中;铁碧玉脉与凹凸棒石断层岩相互交切,显示两者同期、交替形成。这与产在江苏溧阳盆地西缘的相同围岩—绿帘石化安山质晶屑凝灰岩的层间裂隙中的、岩浆热液形成的凹凸棒石粘土矿体的特征完全不同。可见,凹凸棒石断层岩的形成与岩层断裂、错移、脆性破裂和韧性变形的多期活动过程有密切关

系,并均发生在(玄武)安山质熔结凝灰岩固结之后。其依据为凹凸棒石断层岩新鲜断面雪白色,夹星点状黑色铁锰、铁钛氧化物,局部含有安山质糜棱岩,有时外表因铁氧化物污染而呈褐红色,一般呈板状构造;质轻,吸水性强,具强粘舌感。在光学显微镜下凹凸棒石呈纤维束状,具一级灰白至一级浅黄干涉色,低负突起,平行消光。岩石化学成分分析数据投点在 Al_2O_3 - Fe_2O_3 - MgO 三元组分关系图显示断层岩凹凸棒石具热液型组分特征,在偏光显微镜和扫描电子显微镜下,凹凸棒石呈微晶纤维束状,具定向排列,毛发状细长纤维有弯曲变形,有时纤维束呈U型韧性变形的鞘褶皱;凹凸棒石微晶纤维也有呈不规则网格状。X射线粉末衍射峰显示与安徽全椒热液型凹凸棒石特征衍射峰接近。TEM图像分析同样表明与热液凹凸棒石接近。断层岩凹凸棒石与一般热液凹凸棒石(如安徽全椒、贵州大方和重庆奉节等)也有不同,如矿物组合中未见方解石。其原因可能与围岩(碳酸盐岩)不同有关,也可能与热液蚀变交代产生含Ca的绿帘石、孔雀石化有关。

笔者认为,凹凸棒石断层岩产于郯庐断裂带肥东龙山段北北东向脆—韧性、压—剪性左行平移断裂及其配套、派生断裂中;围岩为早白垩世(玄武)安山质熔结凝灰岩;断层岩凹凸棒石呈纤维束状,定向排列,有时呈U型韧性变形—鞘褶皱;凹凸棒石微晶纤维呈不规则网格状;凹凸棒石含量高,仅含极少量亚微米—纳米级石英和钠长石颗粒;与凹凸棒石断层岩同期、交替产生铁碧玉脉,以及绿帘石化、孔雀石(含铜矿物氧化形成)化等热液蚀变。与安徽全椒热液型凹凸棒石^[25]对比,两者具有不同之处:(1)产出形态不同:前者断层凹凸棒石呈纤维束状,纤维平行断层走向生长,并在凹凸棒石断层岩内部及其与围岩之间可见断层摩擦镜面和近水平擦痕等断层晚期或最后活动的痕迹,凹凸棒石断层岩或脉与铁碧玉脉同期、交替产生,并有绿帘石、孔雀石(含铜矿物氧化形成)化热液蚀变;后者脉状凹凸棒石产出形态有树皮状、纤维状和致密块状等。树皮状或马粪纸状的凹凸棒石一般为单矿物集合体,只含很少量微粒方解石和石英杂质;纤维状和致密块状凹凸棒石常与较多的方解石和蛋白石共生;分异完好的脉体,其两壁为梳状方解石晶簇,内为块状蛋白石,中心为纤维状凹凸棒石,凹凸棒石晚于蛋白石和石英。(2)产出断层性质不同,前者为压—剪性、脆—韧性,凹凸棒石在断层中心呈带状薄层,厚度几厘米至几十厘米,产出部位为强烈压—剪性窄带,外侧为(玄武)安山质熔结凝灰岩角砾岩;在强烈压—剪性宽

带,局部无凹凸棒石断层岩地段,出现(玄武)安山质熔结凝灰岩糜棱岩;凹凸棒石断层岩除凹凸棒石外,局部还见红色安山质断层糜棱岩角砾混杂;后者为张性,脉体宽窄不一,脉壁多不整齐,脉体局部有膨大和缩小现象。(3)产出围岩不同,前者为(玄武)安山质熔结凝灰岩,后者为正长闪长玢岩和镁质大理岩;产于正长闪长玢岩中的裂隙时,纤维状凹凸棒石包裹胶结的正长闪长玢岩岩屑及长石、石英碎屑,均呈棱角状,没有被交代迹象。(4)矿物组合不同,前者为铁碧玉脉和凹凸棒石断层岩或脉同期、交替产生,伴有绿帘石和孔雀石(含铜矿物氧化形成)热液蚀变,凹凸棒石纤维晶体间有极少量石英团粒和钠长石颗粒;后者有方解石、蛋白石和凹凸棒石。(5)凹凸棒石晶体大小有差异,后者明显大于前者。

可见,两者虽同为热液型,但成矿热液来源及其成矿机制有别。前者可能是构造动力变质热液叠加地下水热液,来源于构造动力引起的动热热液叠加下渗雨水深循环地下水热液;后者可能是岩浆热液叠加下渗雨水深循环地下水热液。肥东龙山凹凸棒石断层岩拟在构造动力(压—剪切力)作用下,由机械能转化为动能(压、剪应力)、热能(温度)和化学能;快速、激烈错动,引起(玄武)安山质熔结凝灰岩熔融,冷却形成玻化岩;慢速、错移,引起岩石矿物变形、破碎、析水(叠加下渗雨水),岩石由脆性变为塑性、由脆性破裂而成碎裂岩变为韧性变形、矿物晶格变形、位错、破键、重结晶形成糜棱岩,提高表面积和细粒效应,加速碎粒、矿物及新生矿物的水解、络合化学作用,或激发元素的活化、迁移,以分子的形式进入溶液并形成含矿溶(热)液,称为构造动力变质热液;含矿热液受构造动力驱动向低能量、低压或低应力、低温、低浓度方向(向上、向两侧、两端)的通道(或层间、断裂、裂隙)运移、并蚀变交代和萃取围岩成矿物质,一起在适宜空间(层间、层间虚脱部位、断层、裂隙等)聚集,随温度、压力、pH值、氧化还原等变化,特别在低温、低压、弱碱变碱性、氧化变还原过程中,先铁碧玉、后凹凸棒石结晶析出、定向生长微细晶粒,以及热液蚀变,形成铁碧玉脉和含微量、微粒石英和钠长石的凹凸棒石断层岩或脉,以及热液蚀变形成的绿帘石(含Ca)和含铜矿物(氧化为孔雀石)。而当含矿热液为弱碱性、碱性,热液中的 $[Mg^{2+}]$ 、 $[H_4SiO_4]$ 活度因铁碧玉脉和凹凸棒石断层岩的形成而变化时,便发生凹凸棒石断层岩和铁碧玉脉的交替形成;成矿过程中构造动力作用的持续、强弱变化,更使铁碧玉脉与凹凸棒石断层岩或脉互相穿插、交替出现。还由于构造动力作用下的元

素活化分异和热液结晶分异的双重作用,致使铁碧玉脉和凹凸棒石断层岩或脉的矿物组成较岩浆热液形成的矿物组成单纯,近乎单矿物组成。也就铸成该亚型矿床(点)上述的独特标志。笔者将这一成矿作用称为构造动力变质成矿作用,将这种成矿作用形成的矿床(点)称为构造动力变质型矿床(点),与其它热液成因类型(亚型)相区别。

(4)混合热液亚型

混合热液是指两种或两种以上热液混合后形成的热液,如岩浆热液与下渗雨水、地下水与下渗雨水、构造动力变质热液与下渗雨水等形成的混合热液。由混合热液形成的矿床(点)称为混合热液型或亚型矿床(点)。以贵州大方凹凸棒石粘土矿(点)^[37]为例,地层为寒武系娄山关群、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系及第三系,其中以二叠系、三叠系出露最广,主要为浅海相碳酸盐岩、陆源碎屑岩,辉绿岩、玄武岩以及火山碎屑岩;第四系以坡积物广布地表。构造以北东向为主,东西向其次;褶皱较宽缓,断裂发育中等,裂隙广泛分布;在碳酸盐岩中常沿裂隙形成溶槽、溶沟、溶洞及溶蚀地貌。凹凸棒石粘土矿床(点)主要分布在钢厂穹窿北侧、抬沙及毛栗坡两背斜东翼,余者则全县零星散布。该县凹凸棒石粘土矿床(点)类型多、分布广、纤维长短皆有、品位高低均存。含凹凸棒石矿体有囊状含矿体、脉状含矿体和似层状含矿体,其中以囊状含矿体最具经济价值,主要分布于下二叠统茅口组一、二段,下三叠统夜郎组一、二、三段及飞仙关组碳酸盐岩岩溶凹地、碎屑岩台地的第四系残坡积物以及岩溶洞穴堆积物中。

产于下二叠统茅口组一、二段岩溶凹地的含矿体凹凸棒石以片状、皮壳状、薄板状及不规则团块状产于含矿体下部。含矿体上部常为棕红色粘土夹辉绿岩、玄武岩、灰岩、硅质岩碎块。显示岩石经风化、淋滤、晶出、淀积、残积的特征。含矿体在平面上多呈北东向、次为南北向及北西向密集排布在茅口组三段地域,或一段顶界之下40m范围内,构成含矿带。

产于下三叠统夜郎组一、二、三段及飞仙关组碳酸盐岩的岩溶凹地及台地的含矿体,凹凸棒石呈板片状夹于黄、褐黄、灰黑色粘土中,并伴有高岭土及褐铁矿团块。产于岩溶洞穴中的含矿体主要受北东、南北及北西向裂隙控制,广布碳酸盐岩出露区。当洞穴发育于成矿有利地段时,给凹凸棒石的富集提供了空间,堆积物以褐黄色粘土夹凹凸棒石,并伴有石灰华沉积。凹凸棒石有薄板状和不规则团块

状。凹凸棒石主要充填于陡倾的北东向裂隙中,部分沿南北、北西和东西向裂隙充填,极少数沿层间裂隙填充。围岩为下二叠统茅口组一段灰、深灰色厚层至块状亮晶灰岩,下三叠统夜郎组二、三段灰色中-厚层状含粘土质生物泥晶灰岩、紫红色中厚层状钙质粘土岩及泥灰岩,飞仙关组紫灰、褐黄色粘土岩及灰、灰绿色薄层状泥灰岩,以及辉绿岩等。似层状含矿体凹凸棒石产于沉积岩层间。含矿层位有下二叠统栖霞组二段深灰色眼球状含生物屑钙质泥岩,上二叠统峨眉山玄武岩组底部的黄白色凝灰质粘土岩、龙潭组底部的白色粘土岩及大隆组的蒙脱石粘土岩。由于地质工作程度较低,测试分析样品较少,有待进一步研究评价。

该区具有经济价值的凹凸棒石粘土矿床为风化淋滤-残积、混合热液亚型矿床。控矿因素有:①物质因素,该区地层岩石是凹凸棒石粘土矿床形成的重要物质来源。三叠系各组段碳酸盐岩、粘土岩、粉砂岩、含火山碎屑岩及火山碎屑岩,以及峨眉山玄武岩及辉绿岩,是提供凹凸棒石形成的物质基础。该区具有工业价值的凹凸棒石粘土矿床(点)大多分布在辉绿岩、峨眉山玄武岩及下三叠统永宁镇组含火山碎屑岩之下,并呈似“带状”分布。而下二叠统茅口组一、二段,下三叠统夜郎组和飞仙关组碳酸盐岩类,易被地表水及地下水溶解,即可分解出 CaCO_3 、 MgCO_3 等,为凹凸棒石形成提供物质组分。②气候因素,自中更新世以来位于气候湿热,降雨量较多,风化作用强烈地带,为凹凸棒石粘土矿床(点)的形成提供水源、营力、环境、空间等创造了有利条件。③构造因素,该区凹凸棒石粘土矿床(点)的赋存和分布与断层、裂隙有密切关系。岩溶、洞穴形成难易与岩石成分和性质有关,还与断裂有密切关系。岩石断裂、破碎,利于地表水下渗,地下水循环,岩石矿物易于风化、水解,岩溶凹地、台地、溶洞、洞穴形成。构造、岩溶地貌为较大凹凸棒石粘土矿床的形成提供运移、聚集、堆积的赋存空间;次级断层及裂隙为矿液运移和脉状矿床形成提供通道和矿质淀积的场所。该区次级断层和裂隙主要有北东、南北、北西和东西向,其中以北东向为主,凹凸棒石粘土矿床(点)主要沿其分布。

上述成矿控矿因素分析可见,大致自中更新世以来,该区二叠系、三叠系地层岩石经漫长地质时期的构造运动、变形、断裂,经湿热气候、雨水冲刷、侵蚀、剥蚀、溶解风化,一方面铸成中山、中高山地貌,以及岩溶台地、凹地、岩溶和洞穴等成矿物质堆积的负地形;另一方面将风化岩石、碎屑经重力崩坍和地

表水搬运、堆积在这些负地形部位;此外,在湿热气候下,地表水下渗成地下水或与地下水混合、将易溶物质溶解、成为含矿溶液,并继续下渗循环;而难溶物质疏散地留在近地表部位,氧化、土壤化,形成褐黄、黄绿、棕红、紫红色、粘性高的含凹凸棒石粘土,以及黏土层底部近基岩或其裂隙中的凹凸棒石,与凹凸棒石伴生的石膏、方解石、高岭石、钠明矾石、蒙脱石和白云石等次生矿物,均表明含 Si、Al、Ca、Mg 等矿质的溶液沿土壤颗粒间、岩石裂隙中迁移,在黏土层中、黏土层近基岩及基岩裂隙中等适宜部位聚集,随 pH 质由酸性向弱碱性、碱性变化,不同矿物先后结晶、淀积,相互转化(如 Mg^{2+} 增加、pH 值提高,蒙脱石转化为凹凸棒石)。可见,凹凸棒石的成矿作用自中更新世以来,延续至今,一直在不断进行。据此预测,凹凸棒石的成矿作用和相互转化,还将继续,表明凹凸棒石形成物资来源的多样性,赋存条件的广泛性,晶出温压的常态性,含矿溶液 pH 值由弱酸性向碱性变化,导致凹凸棒石在自然界的广泛性、不稳定性和稀有性。

2.3 风化型

风化型矿床(点)是指近地表岩石(层)经物理、化学、生物等风化作用形成的矿床(点),主要有风化淋滤亚型和风化残积亚型。

(1) 风化淋滤亚型

该亚型矿床是由于富含 MgO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和 Fe_2O_3 等成矿物质的岩石经风化淋滤作用而转入成矿溶液,在适宜(低温、低压、碱性)条件下淀积形成。分布在苏皖断陷盆地的基底玄武岩顶部及近地表的球状风化玄武岩表面和裂隙中,以及玄武岩夹层的尖灭部位,可构成单独矿床,也可为火山—沉积亚型矿床的一个矿层或矿段。矿石类型以含凹凸棒石蒙脱石为主,少数以凹凸棒石为主,后者显示风化淋滤和转化较完全;通常伴有蛋白石和 α 磷石英(α 方英石),凹凸棒石均由蒙脱石转化而成。与火山—沉积亚型凹凸棒石矿床相比,风化淋滤亚型矿床的凹凸棒石结晶程度低,晶形不完整;矿层中含有大小不等的半风化玄武岩残块,矿石具有风化残余结构。该亚型矿床主要有黄泥山、官山、龙王山等矿区凹凸棒石粘土含矿层下部含凹凸棒石蒙脱石粘土岩层及其底板玄武岩顶部风化玄武岩层。

该亚型矿床由玄武岩浆喷发、降落沉积、水的渗透、淋滤、水解作用形成。高岭石、蒙脱石首先形成,而后随介质 Mg 的组分浓度增加、pH 值增高转化或形成凹凸棒石、海泡石。根据组成玄武岩的主要矿物以及高岭石、蒙脱石和凹凸棒石形成的化学反

应式^[15],玄武岩风化作用分为二阶段:第一阶段为易溶组分减少,惰性组分增加的半风化阶段,是组成玄武岩的橄榄石、辉石和基质部分的玻璃质成分分解,橄榄石伊丁石化,但基质和斑晶斜长石未发生变化;易溶组分 CaO 、 MgO 、 K_2O 等大量淋失, Al_2O_3 、 TiO_2 、 FeO 和稀土元素含量相对增加,微量元素 Ba 含量轻微降低,Sr 含量显著增加。第二阶段为粘土化阶段,包括高岭石、蒙脱石和凹凸棒石(有时海泡石)粘土形成阶段。前者在第一阶段基础上,玄武岩的造岩矿物进一步分解,主要为斜长石类矿物粘土化,产生高岭石、蒙脱石、绿泥石等,并析出游离二氧化硅,以固相蛋白石、 α 磷石英(α 方英石)及石英形式出现。

(2) 风化残积亚型

该亚型矿床(点)分布广泛,规模较小,矿石类型较多,凹凸棒石含量变化较大,是干旱和半干旱土壤的典型代表。凹凸棒石为新生的而非成岩作用形成的,含凹凸棒石土壤可以是现代的、也可以是地质时期的古土壤,是镁质、弱碱性、高盐度溶液形成的,共生矿物除蒙脱石、伊利石和伊利石—蒙脱石混层矿物外,还有石膏、方解石和白云石等。如土壤中的凹凸棒石在澳大利亚广泛分布^[38];甘肃灵台黄土—红粘土序列中凹凸棒石是成壤过程中伊蒙/混层矿物在富镁孔隙液中转化形成的自生矿物,指示 3.6~3.2 Ma 东亚季风的重要转型期^[39]。云南宣威,凹凸棒石粘土产于下二叠统茅口组灰岩及其风化残积物中^[40]。江苏六合白土山凹凸棒石粘土含矿岩系中Ⅲ号粘土层,安徽官山矿区凹凸棒石粘土矿层下部含凹凸棒石蒙脱石粘土岩层及其底板玄武岩顶部的风化玄武岩层。其中以官山凹凸棒石黏土层近下部的薄层玄武岩层尖灭部位的风化凹凸棒石粘土最典型。经风化从薄层玄武岩层尖灭部位向里依次为:灰白色凹凸棒石、含蛋白石及蒙脱石→灰绿色蒙脱石(保持完整的玄武岩微气孔构造)→半风化具微气孔构造玄武岩→气孔状玄武岩(顶底面风化为蒙脱石粘土岩)。

4 结 语

我国凹凸棒石粘土矿分布广泛,成因类型多样。以凹凸棒石粘土矿床(点)的矿床特征、成矿条件、控矿因素、成矿作用为依据,首次将凹凸棒石粘土矿床(点)的成因类型划分为 3 种类型和 10 种亚型。首次提出构造动力变质热液亚型,对各种类型、亚型的主要特征和典型矿床(点)作了说明,这对凹凸棒石粘土矿床的成矿理论研究具有理论指导意义,对凹

凸棒石粘土扩大找矿领域具有实践指导意义。

参考文献

- [1] Colson J, Cojan I, Thiry M. A hydrogeological model for palygorskite formation in the Daniancontinental facies of the Provence Basin(France)[J]. *Clay Minerals*, 1997,33(2):333-348.
- [2] Soong R, Perrin ND. An occurrence of palygorskite in a fault Gouge, Karori, Wellington, New-Zealand [J]. *Journal of Geology and Geophysics*, 1983,26(2): 217-218.
- [3] Kamineni DC, Griffault LY, Kerrich R. Palygorskite from fracture-zone in the Eye-Dashwa Lakes granite Pluton, Atikokan, Ontario[J]. *Canadian Mineralogist*, 1993,31(1):173-183.
- [4] Gibbs AE, Hein JR, Lewis SD, McCulloch DS. Hydrothermal palygorskite and ferromanganese mineralization at a Central California Margin Fracture-Zone [J]. *Marine Geology*, 1993,115(1-2):47-65.
- [5] Assouba H, Shaw HR. The occurrence of palygorskite in Quaternary sediments of the Coastal plain of north-west Egypt[J]. *Clay Minerals*, 1980,15(1):77-83.
- [6] Singer A. The paleoclimatic in terpretation of clay minerals in sediments: a review [J]. *Earth-Science Reviews*, 1984,21(4):251-293.
- [7] Chahi A, Duplay J, Lucas J. Analysis of palygorskites and associated clays from the Jbel Hkassoul(Morocco); Chemical characteristics and origin formation [J]. *Clay and Clay Minerals*, 1993,41(4):401-411.
- [8] Pletsch T, Daoudi L, Chamley H, Deconinck JF. Palaeographic controls on palygorskite occurrence in mid-Cretaceous sediments of Morocco and adjacent basins [J]. *Clay Minerals*, 1996,31(3):403-416.
- [9] Khademi H, Mermut AR. Source of palygorskite in gypsiferous aridisols and associated sediments from central Iran[J]. *Clay Mineral*, 1998,33(4):561-577.
- [10] Chahi A, Clauer N, Toulkeridir T. Rare-earth elements as traces of the genetic relationship between smectite and palygorskite in marine phosphorites[J]. *Clay Minerals*, 1999,34(3):419-428.
- [11] Mansur M and Aba-Husayn. Mineralogy of Al-Hass desert soils(Saudi Arabia)[J]. *Clay and Clay Minerals*, 1977,25(2):138-147.
- [12] Tateo F, Sabbadini R, Moradi N. Palygorskite and sepiolite occurrence in Pliocene lake deposits along the River Nile; evidence of an arid climate[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2000,31(3-4):633-645.
- [13] 陈正国. 中国坡缕石粘土矿床成因类型[J]. *现代地质*, 1991,5(3):307-319.
- [14] 郑自立, 宋绵新, 易发成, 等. 中国坡缕石[M]. 北京:地质出版社, 1997.
- [15] 陶维屏, 高锡芬, 孙 祁, 等. 中国非金属矿床成矿系列[M]. 北京:地质出版社, 1994.
- [16] 许冀泉, 方邗森, 王立文. 江苏六合小盘山凹凸棒石粘土的发现及其意义[J]. *科学通报*, 1980, (11): 513-515.
- [17] 王锡岳, 马云萍. 苏南金坛凹凸棒石粘土新矿点的发现[J]. *江苏地质*, 1988, (2):24-26.
- [18] 房迎三, 李汪晴. 安徽嘉山凹凸棒石粘土矿中发现的犀类化石[J]. *安徽地质*, 1994,4(3):62-65.
- [19] 王彤. 湖北随州凹凸棒石的发现和初步研究[J]. *湖北地质*, 1987,1(1):116-120.
- [20] 马元海, 吴建生. 西宁盆地南部第三系含坡缕石粘土的地球化学特征[J]. *青海地质*, 1994, (2):27-33.
- [21] 梁荣桂, 罗福庭, 吴保华. 湖南省浏阳县永和海泡石矿床地质特征及成因机理探讨[J]. *湖南地质*, 1985, (1): 1-11.
- [22] 杨雅秀. 湖南浏阳海泡石矿床中发现坡缕石粘土[J]. *建材地质*, 1985, (4): 17-22.
- [23] 郑达兴, 邓寄温, 邱元正, 等. 京、津、唐地区中元古代沉积型海泡石粘土矿床[J]. *地质力学学报*, 1995,1(2): 90-96.
- [24] 王锡岳, 房尚明. 江苏溧阳坡缕石的发现及初步研究[J]. *江苏地质*, 1991, (2):114-116.
- [25] 方 磐, 潘法惠, 何启才. 安徽全椒坡缕石的研究[J]. *矿物学报*, 1983, (1) :73-77.
- [26] 周家贵, 于志臣. 山东青岛发现坡缕石[J]. *山东国土资源*, 1998,14(4):56-57.
- [27] 王多义. 绵竹酿春池温泉坡缕石的特征及成因探讨[J]. *矿物岩石*, 2004,24(2):14-18.
- [28] 陈天虎, 朱 光, 徐惠芳, 等. 安山质熔结凝灰岩中凹凸棒石断层岩的矿物学特征[J]. *岩石学报*, 2003,19(4): 765-773.
- [29] 周济元, 崔炳芳. 构造动力成矿作用机制的理论基础探讨[C]. 昆明:云南科学出版社, 1994:1-7.
- [30] 周济元, 崔炳芳, 陆彦. 广西凤山金牙金矿床构造动力成矿高温高压实验及其研究意义[J]. *矿物岩石*, 1991, 8(3):29-36.
- [31] 周济元. 四川松潘东北寨微细侵染型金矿床的构造动力成因特征[J]. *火山地质与矿产*, 1994,15(4):1-12.
- [32] 周济元, 崔炳芳, 陆 彦. 新疆哈密玉石银矿矿床特征及成因[J]. *矿床地质*, 1999a,18(3):209-218.
- [33] 周济元, 崔炳芳, 陆 彦. 广西凤山金牙金矿床地质特征、成矿物质来源及构造动力成因[M]. 北京:地震出版社, 1999:125-128.
- [34] 周济元, 崔炳芳, 肖惠良, 等. 新疆若羌县红十井金矿地质特征及深部成矿预测[J]. *地质学报*, 2003,77(1):

- 104-112.
- [35] 周济元,崔炳芳,肖惠良,等. 中国新疆库鲁克塔格-星星峡地区金、银、铜矿地质及预测[M]. 北京:地质出版社,1998.
- [36] 牛漫兰,朱光,刘国生,等. 郯庐断裂带中南段中生代岩浆活动背景与深部过程[J]. 地质科学,2002,37(4):393-404.
- [37] 谢志强,黄关明. 大方县坡缕石矿床地质特征及成因初步探讨[J]. 贵州地质,1991,8(1):32-43.
- [38] 周济元,崔炳芳. 澳大利亚凹凸棒石(坡缕缟石)粘土矿床的分布、类型、特征及成因[J]. 资源调查与环境,2009,30(1):25-32.
- [39] 谢巧勤,陈天虎,季峻峰,等. 甘肃灵台黄土-红粘土序列中坡缕石的分布及其古气候意义[J]. 岩石矿物学杂志,2005,24(6):653-658.
- [40] 李志群. 云南坡缕石及其开发应用前景[J]. 矿物岩石地球化学通报,1997,16(1):135-136.

Discussion on genetic types of attapulgite clay deposits in China

ZHOU Ji-yuan, CUI Bing-fang

(Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing 210016, China)

Abstract: Although the genetic types of the attapulgite clay deposits discovered in China have been carried out in some previous researches, there are still some arguments about the division standard, which is not clear enough. According to the analysis and studying of some materials related to attapulgite clay deposits in China, a new division standard of genesis is carried out in this paper. Three types such as sedimentary-type, hydrothermal-type and weathering-type, and ten subtypes are firstly proposed, which means inland lakes volcanic sedimentary-subtype, inland lakes clastic sedimentary-subtype, inland lakes chemical sedimentary-subtype, marine sedimentary-subtype, magmatic hydrothermal-subtypes, groundwater hydrothermal-subtypes, tectonic dynamic metamorphic hydrothermal-subtypes, mixed hydrothermal-subtypes, weathering leaching-subtypes and weathered eluvial-subtypes. The tectonic dynamic metamorphic hydrothermal-subtypes are firstly proposed, which have important significance on studying metallogenic theory and developing exploration of attapulgite clay deposit.

Key words: attapulgite clay deposit; genesis; type; subtype; China

