

doi: 10.12029/gc20220108

阴江宁, 丁建华, 陈炳翰, 刘建楠, 刘新星. 2022. 中国高岭土矿成矿地质特征与资源潜力评价[J]. 中国地质, 49(1): 121–134.

Yin Jiangning, Ding Jianhua, Chen Binghan, Liu Jiannan, Liu Xinxing. 2022. Metallogenic geological characteristics and mineral resources assessment of kaolin in China[J]. Geology in China, 49(1): 121–134(in Chinese with English abstract).

中国高岭土矿成矿地质特征与资源潜力评价

阴江宁¹, 丁建华¹, 陈炳翰¹, 刘建楠¹, 刘新星²

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2. 河北地质大学, 河北 石家庄 050031)

摘要:【研究目的】本文主要对中国高岭土矿开展资源潜力定量评价, 指导后期勘查找矿与开发。【研究方法】首先是对中国高岭土矿成矿规律进行研究, 按地质成因中国高岭土矿可以分为 3 种类型: 风化型、热液蚀变型和沉积型。然后对中国高岭土矿划分预测类型、总结成矿模式、归纳预测要素, 最后对高岭土矿远景区进行划分并估算资源潜力。【研究结果】风化型和热液蚀变型高岭土矿远景区 69 个, 预测资源量 72.22 亿 t, 主要分布在华南亚热带季风气候区; 沉积型高岭土远景区 109 个, 预测资源量 608 亿 t, 主要分布在中国东北、西北等主要产煤区。【结论】中国高岭土矿资源潜力巨大, 其中煤系高岭土是中国特有高岭土资源, 但是由于技术利用和环境原因, 开发利用率很低, 建议今后开展应用开发技术的研发和政策支持, 对于中国煤系高岭土的规模化加工利用具有重大的社会与经济意义。

关键词:高岭土; 成矿规律; 潜力评价; 风化型; 沉积型; 热液蚀变型; 矿产勘查工程

创 新 点:首次对中国高岭土资源开展潜力评价; 对中国高岭土矿成矿模式预测模型进行了系统总结, 编制了中国高岭土矿产资源的系列图件。

中图分类号: P619.232 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)01-0121-14

Metallogenic geological characteristics and mineral resources assessment of kaolin in China

YIN Jiangning¹, DING Jianhua¹, CHEN Binghan¹, LIU Jiannan¹, LIU Xinxing²

(1. Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2. Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] This paper mainly carries out quantitative evaluation of the resource potential of Kaolin deposits in China to guide the future mineral exploration. **[Methods]** Firstly, the metallogenic regularity of kaolin deposits in China are studied. According to the geological origin, kaolin deposits in China can be divided into three types: weathering type, hydrothermal alteration type and sedimentary type. Then, based on the classification of kaolin ore prediction types in China, the metallogenic model and ore-controlling factors are summarized. Finally, the prospective of kaolin areas are divided and the resource potential is

收稿日期: 2021-01-20; 改回日期: 2021-05-07

基金项目: 中国地质调查局项目“全国矿产资源潜力动态评价(2019—2021)”(DD0190193)资助。

作者简介: 阴江宁, 男, 1975 年生, 博士, 高级工程师, 矿产普查与勘探专业, 主要从事矿产资源潜力评价研究;

E-mail: mark-johnson@163.com。

estimated.[Results]69 prospective areas of weathering and hydrothermal alteration kaolin deposits were delineated with an estimated resources of 7.222 billion tons, which are mainly distributed in the south Asian tropical monsoon climate zone. 109 prospective areas of sedimentary kaolin deposits were delineated with an estimated resources of 60.8 billion tons, which are mainly distributed in the northeast and northwest coal producing areas of China.[Conclusions]Chinese kaolin resource potential is huge and the coal kaolin is unique resources in China, but its utilization rate is very low due to the underdeveloped technology and environmental reasons. It is suggested to carry out research and development of coal kaolin application technology and policy support in the future, which is of great social and economic significance for large-scale processing and utilization of coal kaolin.

Key words:kaolin; metallogenic regularity; potential evaluation; weathering type; sedimentary type; hydrothermal alteration type; mineral exploration engineering

Highlights: The potential assessment of Kaolin resources in China was carried out for the first time. The prediction model of Kaolin in China is systematically summarized. Series of kaolin maps were compiled.

About the first author: YIN Jiangning, male, born in 1975, doctor, senior engineer, engages in mineral resources assessment; Email: mark-johnson@163.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey“Dynamic Assessment of Mineral Resources in China (2019–2020)”(No. DD0190193).

1 引 言

“高岭土(Kaolin)”一词来源于中国江西景德镇高岭村产的一种可以制瓷的白色黏土而得名,高岭土矿是高岭石亚族黏土矿物达到可利用含量的黏土或黏土岩,前者主要包括高岭石、迪开石、珍珠陶土、埃洛石、水云母和蒙脱石;后者主要是石英、长石、云母等碎屑矿物,少量的重矿物及一些自生和次生的矿物,如磁铁矿、金红石、褐(针)铁矿、明矾石、三水铝石、一水硬铝石和一水软铝石等(刘阳, 2020)。高岭土的岩石学特征与矿物学特征相同,具有松散土状和坚硬岩石状两种外貌,其矿物成分、化学成分和粒度变化都较大。

高岭土因具有许多优良的工艺性能,高岭土矿产在国民经济和国防建设中占有重要地位。高岭土广泛用于造纸、陶瓷、橡胶、塑料、耐火材料,化工、农药、医药、纺织、石油、建材及国防等部门(申继学等, 2016),火箭、人造卫星、半导体、微波技术、集成电路、广播、电视及雷达等方面几乎都需要陶瓷制品(孟宇航等, 2019)。世界高岭土资源极为丰富,主要分布在欧洲、美洲、亚洲和大洋洲的60余个国家。高岭土资源储量较大的国家和地区为美国、中国、巴西、英国、印度等国家(朱训, 1999)。美国以71.75亿t的储量居世界首位,其次是中国(34.96亿t)和印度(27亿t)^①。美国佐治亚州是世界高岭土主要出产地,该地区高岭土矿床为沉积型矿床,主要出产粒度细、纯度高,含铁低的片状高岭石,属于

巨大、优质高岭土矿床。英国高岭土资源主要分布在康沃尔郡圣奥斯特尔花岗岩体(StAustell Granite)的西部和中部、德文郡达特姆尔花岗岩体(Dartmoor Granite)的西南边缘地区以及柏德明花岗岩体(Bodmin Moor Granite)的西部和南部地区。巴西拥有世界上最好的层状沉积高岭土矿床,高岭土白度高,结晶完美,粒度较细,非常适合用于造纸。巴西北部地区的帕腊州是巴西主要的高岭土产区,该地区主要的高岭土矿床包括亚马逊河北部的贾里河高岭土矿床和贝伦市南部的卡滨河高岭土矿床(Robert, 2016)。印度高岭土在多个地区均有分布,如喀拉拉邦、西孟加拉邦、拉贾斯坦、奥里萨邦、卡纳塔克邦等(孔德顺, 2014)。

2 中国高岭土矿资源概况

2.1 中国高岭土资源现状

中国是世界上高岭土资源丰富的国家之一,截至2019年底,累计查明资源储量为34.96亿t,有525个矿区,矿石储量大于100万t的大、中型矿区有188处^②。中国南方风化型高岭土资源广泛分布,资源量可观,除此之外,中国北方石炭纪—侏罗纪、古近纪—新近纪煤系地层中沉积型高岭土资源量巨大,远景资源可达数百亿t。在矿石质量上,中国高岭土多为普通陶瓷用土,优质造纸涂布用高岭土比较短缺,以苏州、茂名、龙岩、大同的高岭土为好,由此可见中国高岭土储量在近二十年都可以充分保证需求,但是中国优质高岭土资源保障程度不高(叶张煌等, 2016)。

2.2 地理分布

中国高岭土资源分布广泛,遍布全国六大区21个省(市、区),但又相对集中,江西省是探明高岭土储量最多的省,其次为吉林、新疆、福建、广西、湖南等省,其他有高岭土储量的省区有河北、山西、内蒙古、辽宁、浙江、安徽、山东、河南、湖北、海南、四川、

贵州和云南(图1),全国高岭土矿产分布见图2。

2.3 资源禀赋

中国高岭土矿石类型以砂质高岭土为主,大约占总储量的60%以上;软质高岭土和硬质高岭土占总储量分别为6%和5%左右;其他未划分类型的高岭土占总储量的27%左右(李国栋等,2018)。

从矿石质量来看,中国高岭土矿石大多为陶瓷用土,Al₂O₃含量(品位)一般为20%左右,最高可达38%以上,最低不低于10%。过去,中国造纸涂料和填料级的高岭土比较短缺,1989年新探明的广东茂名高岭土矿,不仅储量巨大,而且矿石质地优良,达刮刀涂布级质量标准,它的发现使中国进入拥有优质高岭土资源的大国之列(苏燕华,2016)。在全国高岭土储量中,造纸级高岭土占41.06%,陶瓷级高岭土占48.35%,其他如白水泥级、橡胶级和电瓷用高岭土合计仅占10.59%(孟宇航,2019)。

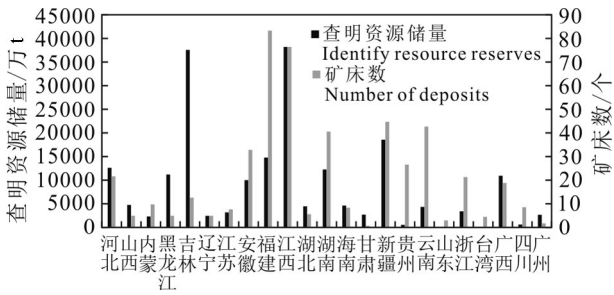


图1 中国高岭土资源分省储量分布图

Fig.1 Distribution map of Kaolin resources in China by provinces



图2 中国高岭土矿产地分布图
Fig.2 Distribution map of Kaolin deposits in China

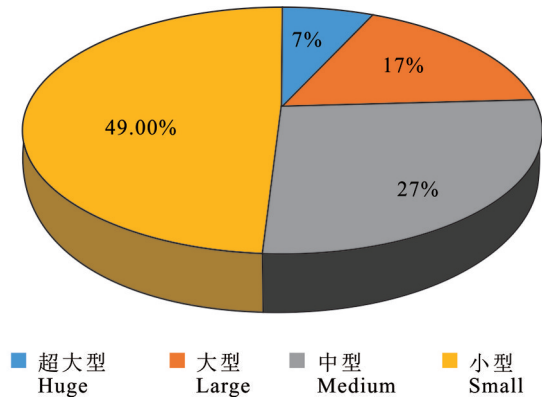


图3 中国高岭土矿床规模占比图

Fig.3 The proportion of kaolin deposits with different quantities in China

中国高岭土矿床以中小型为主(图3),在上表的300余个矿产地中,据《高岭土、膨润土、耐火黏土矿产地质规范》(DZ/T 0206-2002)矿床规模划分标准及《固体矿产资源储量分类》(GB/T-17766-2020)储量分类标准,高岭土矿石储量(含资源量)大于2000万t的特大型矿有15个,包括江苏吴县阳山矿(2100万t)、福建龙岩东宫下西矿区(5454万t)、江西贵溪县上祝矿(2860万t)、广东惠州沙尾(2100万t)等,超大型矿其中有将近一半是产于煤层中的沉积型高岭土矿。矿石储量(含资源量)为500~2000万t的大型矿有30处(表1);矿石储量(含资源量)100万t至500万t的中型矿有62处;矿石储量(含资源量)小于100万t的小型矿有111处。在大型矿床中已进行勘探地质工作的有10处,详查的有16处,普查的有9处;中型矿床中进行勘探工作有9处,详查的有29处,普查的有24处;小型矿床中进行勘探工作的有9处,详查的有53处,普查的有42处。

中国高岭土矿以单一矿产为主,共生矿产有明矾石、黄铁矿、叶蜡石、膨润土、钾长石、瓷石、石英岩、铝土矿、煤、贵金属、稀有分散元素等(陈开慧,1984),在选矿中尽可能回收利用伴生矿物(如云母、明矾石等)和选矿后的尾砂(石英砂、长石石英砂、钾长石砂)以及尾矿中的副矿物(如铌铁矿、锆石、磷灰石),以增加矿山经济效益(王浩,2013)。

2.4 中国高岭土矿床类型及成矿时代

高岭土按其成因可分为原生高岭土、次生高岭土,前者指铝硅酸盐矿物组成的中酸性岩石经长期化学风化后未经自然力搬运而与母岩残留在一起

的高岭土,中国南方地区所产高岭土多属这种类型;后者是指经自然力搬运而沉积下来,同时在搬运和沉积过程中又混入各种杂质的高岭土,主要产于石炭系一二叠系的煤层中,以煤层中顶底板、夹矸或单独形成矿层独立存在,当煤矸石中高岭岩含量超过80%就称为煤系高岭土矿(孔德顺,2014),属于硬质高岭土,具有较高的利用价值,是中国独具特色具有广阔利用前景的重要非金属矿产(王树来,2001)。原生高岭土矿又可分为风化型高岭土和热液蚀变型高岭土。

不同类型的高岭土矿具有不同的赋矿地层(图4),风化型高岭土矿床与中国华南大面积分布的中生代(燕山期)花岗岩及有关脉岩分布区相吻合;热液蚀变型高岭土矿床在中国东部主要与中生代中一晚期火山活动有关,大多数矿床赋存于侏罗系上统的火山岩中,在中国西部与第四纪火山活动及地热活动有关;沉积型高岭土矿床,多产于二叠系煤系发育地区,也有部分沉积型高岭土矿床在古近纪一新近纪或第四纪河、湖、海湾沉积,在中国北方,凡是石炭纪一二叠纪煤系分布的地区,都有找到高岭石黏土岩型矿床的可能。

3 高岭土成矿模式及预测要素

3.1 风化型高岭土

该类型矿床与大面积中生代(燕山期)花岗岩及有关脉岩分布区相吻合,在中国南方广泛分布。中国南方大部分地区属于热带和亚热带气候区,年平均温度为15~25℃,年平均降雨量为1000~2000 mm,干湿气候为母岩的风化淋滤带来良好的条件(黄长生等,2021)。从地形上看,风化型矿床往往保存在丘陵、台地或山间盆地的残丘上,风化深度一般为50 m左右,深者可达100 m以上(王念功,1984)。

3.1.1 矿床成因及成矿模式

铝硅酸盐矿物组成的岩石风化残积成高岭土矿床要经过长期地质作用,主要为内生岩浆作用和表生风化成矿作用两个重要阶段。在内生岩浆作用阶段,由于强烈的构造运动,致使长英质岩局部熔融,产生花岗质熔融体,在外界条件制约下,源地岩浆分异演化,形成富硅铝岩浆。在岩浆结晶晚期,热液蚀变使岩体产生交代作用,特别是在岩体边缘地带,黑云母普遍白云母化,随着蚀变作用

表1 中国大型以上高岭土矿床

Table 1 Large and superlarge Kaolin deposits in China

序号	市县	矿产地名称	规模	矿床类型	成矿时代
1	广西北海市合浦县	十字路	超大型	风化型	第四纪
2	吉林省吉林市磐石市	新立屯	超大型	风化型	第四纪
3	新疆库尔勒市	塔什店	超大型	沉积型	始新世—渐新世
4	内蒙古清水河县	龙泉沟	超大型	沉积型	石炭纪
5	黑龙江依安县	保董屯	超大型	风化型	第四纪
6	广西玉林市博白县	元陂岭	超大型	风化型	第四纪
7	湖南醴陵市	长颈坳	超大型	风化型	第四纪
8	安徽省萧县	孟庄煤矿	超大型	沉积型	二叠纪
9	福建龙岩市	东宫下	超大型	风化型	第四纪
10	山西河曲县	范家梁	超大型	沉积型	中生代
11	河北遵化市	西岫子	超大型	热液型	侏罗纪
12	山西怀仁县	吴家窑	超大型	沉积型	中生代
13	甘肃山丹县	东水泉	超大型	沉积型	石炭纪
14	江西鹰潭市贵溪市	上祝	超大型	风化型	第四纪
15	广西玉林市兴业县	龙安	超大型	风化型	第四纪
16	广东惠州	沙尾	超大型	风化型	第四纪
17	江苏苏州市吴县	阳山	大型	热液蚀变型	燕山晚期
18	福建龙海市	龙海龙江	大型	风化型	第四纪
19	湖南汨罗市	白水桔园	大型	风化型	第四纪
20	湖南汨罗市	白水关山	大型	风化型	第四纪
21	安徽省淮北市	相山区 朔里煤矿	大型	沉积型	二叠纪
22	海南海口市	长昌水嘴坡	大型	风化型	第四纪
23	福建同安区	郭山	大型	风化型	第四纪
24	辽宁东沟县	万宝	大型	风化型	第四纪
25	海南文昌市	龙楼镇	大型	风化型	第四纪
26	云南临沧市	博尚	大型	沉积型	新近纪
27	湖北恩施市	花石板	大型	沉积型	二叠纪
28	福建永春县	永春大丘头	大型	风化型	第四纪
29	山西怀仁县	小峪	大型	沉积型	中生代
30	黑龙江嫩江县	板桥子南山	大型	沉积型	第四纪
31	江苏苏州市吴县	阳山	大型	热液蚀变型	燕山晚期
32	云南永平县	卓潘 抱罗镇	大型	风化型	第四纪
33	海南文昌市	三阳村 相山区	大型	风化型	第四纪
34	安徽省淮北市	岱河煤矿	大型	沉积型	二叠纪
35	安徽省宿州市	芦岭煤矿	大型	沉积型	二叠纪
36	云南元江县	因远	大型	沉积型	第四纪
37	江苏南京市江宁区	祖堂山	大型	风化型	白垩纪
38	福建同安区	东坑	大型	风化型	第四纪
39	贵州丹寨县	窑货厂 抱罗镇	大型	沉积型	二叠纪
40	海南文昌市	福朝村	大型	风化型	第四纪
41	湖南溆浦县	活水	大型	风化型	第四纪
42	江西景德镇市浮梁县	高岭村	大型	风化型	燕山期
43	江苏常州市溧阳市	凤凰山	大型	热液蚀变型	白垩纪
44	西藏当雄县	羊八井	大型	风化型	第四纪

的强弱差异变化,形成了富硅铝酸盐矿物而贫铁的白云母花岗岩及二云母花岗岩(王根厚,2008)。二者呈渐变关系,为高岭土矿床成矿奠定了物质基础。在表生风化成矿作用阶段,岩体所处地段区域上构造活动较为强烈,致使岩体及其上覆地层严重破裂,加上其他营力(重力、气候变化等),从而加速了岩体的物理风化作用。岩体裸露地表后,因地处亚热带,气候温和潮湿,植被繁茂,对岩石化学风化作用十分有利,容易形成富硅铝风化壳。矿点多分布于丘陵地带,花岗岩风化作用形成的风化壳厚度大于遭受剥蚀的厚度,在漫长的化学风化作用中,Al₂O₃与Fe₂O₃等成分相对富集或分散,形成了现今风化壳厚度保存较好的高铝低铁高岭土矿床(崔越昭,2008)。

(1)原岩成矿物质条件:高岭土蚀变前的原岩是影响其质量的先决条件,由于中性—基性原岩中铁、钛含量高,形成的高岭土中铁、钛含量仍然很高,决非优质矿,甚至不能成为高岭土矿。风化型高岭土矿床主要由铝硅酸盐矿物组成的岩石经长期化学风化作用形成(缪向亮,2014)。

(2)岩石风化条件:在表生风化成矿作用阶段,原岩经风化作用形成富硅铝风化壳。岩石风化壳风化阶段分为早、中、晚期3个阶段。早期风化阶段岩石中的K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺等离子部分逐渐被水溶液中的H⁺置换,从矿物晶格中离解出来,大部分随水迁出风化产地,而难溶解矿物中Ca、Mg等流失少,则相对富集,成为早期富Ca阶段。中期阶段原岩中的铝硅酸盐在湿热条件下经风化成为黏土矿物,属次生铝硅酸盐,如高岭石等,不易流失,就地残积。花岗岩风化壳高岭土矿床即为中期风化富硅铝阶段的产物。晚期在湿热条件下高岭石继续风化,SiO₂不断游离出来,使高岭土脱硅成为富铝阶段。矿点多处湿热气候地带,花岗岩风化作用较为强烈,正处于中期富硅铝风化阶段,为形成风化壳残积型高岭土矿床提供了有利条件(陈涛等,2003)。

(3)构造成矿条件:经历多次构造运动和长期的发展演化历程,各种类型的构造运动发生、发展、继承、改造复合等复杂多变,对成岩成矿的制约也相对复杂。复杂的构造,也是成矿的主要因素之一。断裂及褶皱构造对岩浆侵入具有明显的控制作用,早期的构造运动形成的断裂为岩浆侵位提供了上升通道和成岩空间,岩体的空间侵位严格地受基底褶皱和区域

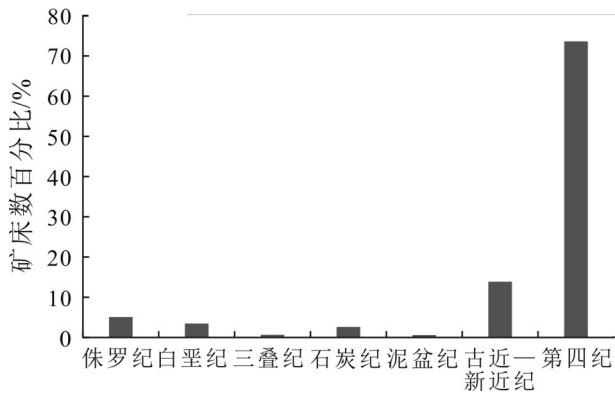


图4 中国高岭土矿成矿时代分布图

Fig.4 Distribution map of kaolin mineralization age in China

性大断裂的联合控制。后期的构造运动使已侵位的原岩破碎,这属于物理风化作用。并且大量的断裂构造为地下水的流动提供了很好的条件,有利于水介质对岩石进行充分的淋洗,去除有害组分,从而加速成矿作用;断裂构造还使风化成矿作用向花岗岩深部发展,形成更大的矿体(郑翔等,2018)。

3.1.2 预测要素及找矿标志

形成风化型高岭土矿床的花岗岩富含长石,少含暗色矿物,主要岩性为白云母花岗岩,次为二云母花岗岩,此类花岗岩多呈岩株、岩瘤或岩枝岩脉产出,其化学成分中含有较低的铁、钛含量,也是形成质量较好的高岭土矿的先决条件。所以,加强对此类花岗岩体的勘查工作,对于寻找高质量高岭土矿大有裨益。花岗岩风化壳的形成严格受到外生作用的制约,温湿、热湿气候,雨量充沛、植被发育、土壤呈酸性,均有利于风化壳的形成。地貌条件主要制约风化壳的保存与剥蚀,一般在山顶、山脊及缓坡地段风化壳相对保存完好,大都有工业矿体存在。另外,风化壳含铁质少,含白云母少,高岭土呈灰白色、淡黄色等色调时,往往是优质高岭土的重要找矿标志。

处于亚热带季风气候区,温湿的气候条件,繁茂的植被,为岩石的化学风化作用提供了有利的条件。复杂密集的断裂等地质构造,为成岩成矿提供了良好的通道和空间;后期的断裂使岩体碎裂,发生物理风化,加快了岩石的化学风化作用;深大断裂使岩石的风化作用进入矿体深部,形成更大矿体。加强山顶、山脊及缓坡等地段对富含长石、少暗色矿物的白云母花岗岩的勘查工作,对于寻找高质量高岭土矿有重要意义。

3.2 热液蚀变型高岭土

热液蚀变型高岭土矿床主要矿物成分为高岭石和埃洛石,次要成分为石英、绢云母、黄铁矿、明矾石等,主要为显微隐晶结构、鳞片状、纤维状、残积结构,土块、条纹状、角砾状构造等。以江苏观山高岭土矿为代表,其他还有浙江瑞安仙岩和松阳峰洞岩、福建德化金竹坑、吉林长白马鹿沟、河北宣化沙岭子等高岭土矿,其中观山储量居于首位(袁又申,1984;谢宽,1986)。

3.2.1 矿床成因及成矿模式

热液蚀变作用是地下循环热水对岩石的蚀变过程。其热量可能来源于大量的侵入体(如花岗岩)的冷却或深部热水的循环或放射性元素的辐射(高温花岗岩)。渗透作用和断裂、破碎使得热液有足够的高差渗进并改变岩石。花岗岩是原生高岭土矿床的常见基岩,不含或少含黑云母的花岗岩对高岭土成矿有利。随着热液循环作用的进一步进行,花岗岩便被逐步演变成以高岭石为主的黏土矿。蚀变作用的影响,类似于花岗岩里的长石转化为含少量云母的高岭石的风化作用,也类似于某些原生云母在较强烈的蚀变区域转化为高岭石的情况。西班牙北部的布里纳和中国的苏州高岭土矿床就是这类矿床的范例。与金属硫化物成矿作用有关的热液型高岭土矿床常含有一些钠明矾石。以观山高岭土为例,该矿床位于扬子拗陷太湖隆起湖州—苏州断块东缘、木轱短向斜与谭东—光福—通安断裂北东延伸交界处,矿区内中生代燕山期岩浆活动强烈、频繁,晚侏罗世发育一套以安粗质凝灰岩和凝灰熔岩为主的火山岩,呈岩枝状的石英安粗岩在矿区发育,同时石英二长岩和二长花岗岩在矿区局部地区有侵入。侏罗纪以后,又有多期酸性、基性岩脉侵入。区内出露地层有:二叠系孤峰(堰桥)龙潭组砂页岩,二叠系长兴组—三叠系青龙群灰岩和侏罗系龙王山组火山岩和青龙群—长兴组灰岩及孤峰—龙潭组砂页岩的接触部位。矿区发育北北东、北东向和北西向成矿前断裂,其间普遍有火成岩脉穿插,矿体主要受印支期剥蚀面构造所控制,呈北西向倾斜。

3.2.2 预测要素及找矿标志

该类矿床大多赋存于中生代火山岩发育地区,蚀变分带明显,坚硬的次生石英岩在地形上形成突起的陡崖。迪开石作为较高温度的蚀变矿物,有时

出现在矿床之中;有时高岭土矿与叶蜡石矿、明矾石矿相伴生;有时作为内生金属矿床的外蚀变带存在。中生代火山构造为其重要预测要素,较强的蚀变分带、断裂构造和较多的岩脉穿插是有利的成矿因素。此类型矿床在中国分布较广,主要沿中国东部环太平洋西带和华北地台北缘侏罗纪—白垩纪火山岩带分布。中国东部从粤、闽直至辽、吉,以及华北地台北缘是寻找该类矿床的有利地区。

3.3 煤系高岭土

煤系高岭土是煤炭开采时可综合利用的非金属矿产资源,该类矿床的分布有一定层位,常位于沉积旋回的上部,有明显的沉积韵律(朱如凯,1997)。中国北方石炭纪—二叠纪煤系中夹有许多层高岭石黏土岩,在山西雁北地区一般厚30~45 cm,在内蒙古准格尔旗煤田中厚者可达数米。在山西大同、浑源、怀仁、山阴、朔县,内蒙古乌达、海渤湾,山东新沱,陕西铜川等地石炭纪—二叠纪煤系中都发现了可供工业利用的高岭土岩。

3.3.1 矿床成因及成矿模式

煤系高岭土矿床属于沉积型矿床,与其他沉积岩一样,其成因受古地理、古构造、古气候、水介质条件、物质来源、成岩作用以及后来的风化、淋滤等诸多因素的控制。石炭纪至早二叠世早期,华北区域属于潮湿的热带、亚热带气候,炎热潮湿,雨量充沛、化学风化作用和机械风化作用都十分强烈(赵志根等,1999)。煤系高岭土广泛分布于内蒙古地轴、吕梁山隆起的前寒武纪变质岩、华力西期以前的中酸性岩浆岩中稳定性差的硅铝酸盐矿物遭受风化,形成了大量的以高岭石为主要成分的黏土,这些黏土经冲刷、搬运或以溶胶形式被携带到水动力条件不同的环境中沉积,形成了与煤共生的高岭土矿产。

3.3.2 预测要素及找矿标志

因为煤系高岭土主要是伴生在煤层中,所以其预测要素和煤炭的预测要素基本一致。首先是古地理,古地理直接控制着煤层的形成及空间展布,古地理因素是控制成矿的基本场所和物质基础。古地理受区域地质构造作用的控制,伴随着盆地不同发展阶段以及海水的进退等因素,层序内体系域及沉积体系发生进积、退积和侧向迁移等变化。所以在华北,煤系高岭土的找矿标志为盆地,最有利聚煤环境为三角洲沉积体系三角洲平原相和三角

洲前缘相,其次为河流沉积体系和潮坪沉积体系,最后为潟湖、湖泊、碳酸盐台地沉积体系。

古构造是另一重要预测要素,古构造的控制作用主要表现在两个方面(王双明,2011):第一是大地构造背景。它控制了陆源区和沉积区、海陆分布及海岸线位置等。华北南部秦岭—中条古陆和伏牛古陆的存在长期影响盆地内部海侵和海岸线的位置,从而控制层序内的沉积体系格局,引起成矿层位南北向以及东西部的变化与迁移。第二是盆地内次级隆起和拗陷控制成矿区域的展布。从层序地层的沉积厚度、沉积特征的区域性差异可以看出,华北盆地内存在较多的次级相对隆起和拗陷,表现为煤层分叉和变薄。华北地台大部分地区晚石炭世、早二叠世继承了早期同沉积隆起和拗陷,但是它们的活动性已明显减弱,但依然对聚煤作用、沉积体系的分带起着重要的控制作用。

4 高岭土矿资源潜力评价

4.1 矿产预测方法类型选择

根据中国高岭土矿床成矿地质作用特征,本次预测高岭土为3种类型,分别是与中酸性岩风化蚀变有关的风化型、与火山岩有关的热液蚀变型和与成煤层有关的沉积型高岭土矿。由于风化型高岭土矿主要与花岗岩原位风化有关,在第四纪叠加气候、地形、地貌等因素风化成矿,所以其预测类型划定为第四纪沉积与风化型;热液蚀变型与火山岩有关,是以火山作用为主控制时空定位的矿产,这类矿产在空间上与火山岩、火山侵入体、火山中心或破火山口有关,后期叠加热液蚀变成矿,故预测类型划为火山岩型。煤系高岭土矿产预测类型与煤一致,都是沉积型预测类型(表2)。

根据沉积型和火山岩型矿床的预测要求,针对风化型高岭土预测要素,开展预测过程中,由于高岭土矿产地较多,为了提高预测精确度和效率,选取类型明确,且为大中型以上的矿床作为已知矿

表2 中国高岭土矿预测类型划分表
Table 2 Prediction types of kaolin in China

矿产预测类型	对应的全国矿产预测方法类型
风化型	第四纪沉积与风化型
热液蚀变型	火山岩型
沉积型	沉积岩型

床,小的矿床点如果类型明确亦有保留,经过分析选取断裂缓冲区作为另一预测要素。

4.2 预测区圈定方法及原则

本次评价的高岭土矿,预测方法类型属于沉积型和火山岩型,采用地质体单元法划分预测单元时,应按综合地质信息找矿模型的地质特征、成矿必要要素和重要要素来划分预测区。风化型、热液高岭土矿预测区的圈定采用综合信息地质体单元法,具体过程如下:在全国地质图上提取中酸性岩体、火山岩体以及断裂构造,选择表3中的多个要素进行预测区的圈定。

综合信息地质体单元法,是指应用对预测矿种具有明显控制作用的地质条件和找矿意义明确的标志圈定地质统计单元的方法。地质体单元法由王世称教授等(1993)提出,基于:(1)矿体、矿床、矿田和矿床密集区是天然的有形的特殊地质体;(2)矿产资源体的形成受成矿、控矿地质条件的限制;(3)矿产资源体的存在可以以不同的方式反映出来;(4)成矿、控矿地质条件是可以认识的,其反映的标志也是可以认识的。以地质体为统计单元,需要按综合信息解译模型的地质特征客观地划分统计单元,确定统计单元的定义域和边界条件,并研究不同级别统计单元的特征。矿产预测的地质体单元划分方法主要取决于综合信息解译模型的特点。在综合信息解译模型中,有两种找矿标志,一种是成矿的必要条件,另一种是成矿有利(或不利)标志。地质统计单元的划分以成矿的必要条件为基础,并以成矿有利(或不利)标志为补充来确定综合信息地质体单元。在MRAS软件中使用要素叠加法在建模器中可以实现综合信息地质体单元法的圈定。

评价要素叠加法的基本思想是:评价要素存在的地方,是成矿有利的地方;评价要素越多,成矿的有利度越大。也可理解为“各评价要素等权重”的加权方法。优点是方法简单,操作简便,易于理解,使用面广。

4.3 预测区圈定结果

在综合分析本区地质综合信息的基础上,根据高岭土矿产地的成矿和控矿特点,选择综合信息地质体单元法,根据以上方法原理和圈区原则将其预测区分别圈定出来。

对于风化型、热液蚀变型高岭土矿将所有岩体和断裂做1 km的缓冲区,因为气候区不好准确定位,主要是以华南华东等区域为主,然后对断裂缓冲区和有利气候区进行空间求交分析,圈出初步的预测区,并结合高岭土矿化特点,对预测区进行了适当的合并、拆分及补充,人工圈定了风化型和热液型高岭土的预测区(图5)。

沉积型高岭土资源主要是煤系高岭土,主要分布在煤系地层中,与煤共伴生,所以沉积型高岭土预测区与煤矿预测区基本一致,这里选用全国矿产资源潜力评价中国北方煤矿预测区作为沉积型高岭土预测区,另外根据已知沉积型高岭土矿床点,补充部分沉积型高岭土预测区(图6)。

4.4 资源量定量估算

高岭土矿资源量估算采用地质体积法,其原理是基于矿床模型综合地质信息预测方法体系(肖克炎等,2014),也是全国重要矿产资源潜力评价的核心技术方法。地质体积法是基于矿床模型综合地质信息预测方法中的定量预测方法之一,该方法针对传统的体积法的计算精度问题、估算对象问题等进行了改进,使其更适用于中、大比例尺度的预测评价。模型区的资源总量包括查明资源量、预测资源量和已剥蚀了资源量。

成矿地质体体积由成矿系统空间平面分布范围和延深来决定的。对于沉积矿产和岩浆型矿产,可根据地质、物化探异常等信息来圈定成矿地质体的范围;对于成矿地质体延深深度的确定,可以同时结合地质、物化探、遥感等各种资料,来反演、推测成矿地质体的延深。对于风化型高岭土矿,由于是风化成因,矿体都比较浅,一般都在几米到几十米,这里深度

表3 预测要素表

Table 3 Prediction criterions of intrusion rock type

矿产预测类型	要素类别	要素名称	要素级别	要素属性
侵入岩体型	区域成矿特征	矿床(点)	重要	点
	构造特征	断裂褶皱发育地区	必要	面、线
	气候特征	温湿、热湿气候,雨量充沛,植被发育	重要	面
	岩体	中生代(燕山期)花岗岩	必要	面
	岩体	东部主要与中生代中—晚期火山岩	必要	面



图5 中国风化型及热液蚀变型高岭土矿远景区分布图

Fig.5 Prospective area of weathered and hydrothermal alteration kaolin deposits in China

采用预测区的典型矿床的最大勘探深度。实施定量预测时,对预测区逐个进行定量估算参数的确定,每一个预测区的面积、深度、相似系数等都可能是不同的,也有的可能变化不大,要看实际情况而定。

对于煤系高岭土资源量估算可以采用与其伴生的煤炭资源量来推算。从煤炭开采来看,中国每生产1亿t煤炭,排放矸石1400万t左右;从煤炭洗选加工来看,每洗选1亿t炼焦煤排放矸石量2000万t,每洗1亿t动力煤,排放矸石量1500万t(任瑞晨,2016)。在洗选煤炭中排放的煤矸石中,高岭土平均含量为80%左右,这样与煤炭的资源量基本可以采用1:10的开采比来估算。另外由于煤系高岭土的开采伴随煤炭的开采,此次煤系高岭土的预测深度选用煤炭的预测深度1000 m以浅。

4.5 预测结果及重要预测区评价

风化型和热液型高岭土矿在全国范围内共划分69个远景区,其中A类33个;B类15个;C类21

个,预测资源量共计72.22亿t。沉积型高岭土共划分108个远景区,其中75个A类预测区,6个B类预测区,27个C类预测区,预测资源量608亿t,中国煤系高岭土有着非常可观的远景资源量。本文选择其中10个典型的A类远景区进行资源潜力概略评述,这10个A类重要远景区包括6个风化型,2个热液型和2个沉积型,这些远景区也是今后进行高岭土矿勘探开发的重要主攻方向。

4.5.1 福建永春县大份山—大德寨高岭土远景区FHA21

区域上位于福建永泰—德化晚侏罗世喷发带的东南部,是福建省晚侏罗世火山喷发作用最发育的地区之一,其喷发形式和类型丰富多彩,主要由一套陆相中酸性、酸性火山岩系组成。高岭土矿床赋存于地表浅部,其分布严格受地形地貌、成矿原岩及风化程度控制,具有明显的风化残余矿床特征(钟和清,2014)。该区分布的地层、岩脉是风化残余型高岭土矿床的有利成矿母岩;本区地形以舒缓的中、低

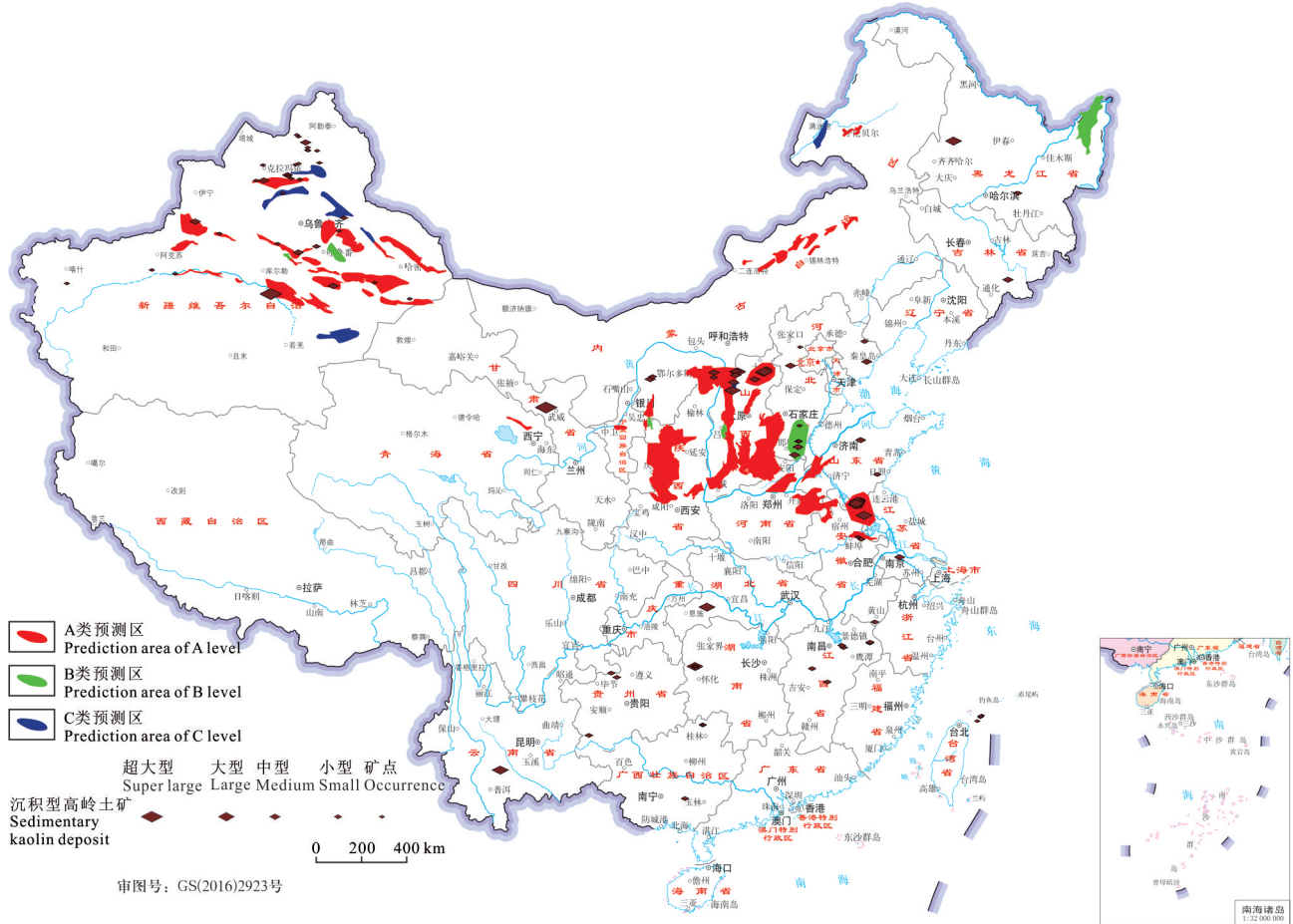


图6 中国沉积型高岭土远景区分布图
 Fig.6 Prospective area of sedimentary kaolin deposits in China

山地形为主,外围为低山环绕地带,有利于风化作用进行;本区气候条件有利于化学风化作用的进行,而且加快岩体的风化速度,促进长石类矿物分解转化成高岭石类矿物。该远景区高岭土矿分布范围广、厚度大、矿石质量较佳的特点,初步估算其地质资源量可达大型规模,找矿远景非常可观。

4.5.2 准格尔煤系高岭土远景区(蒙102)

位于内蒙古自治区鄂尔多斯市的东部,其范围北起东孔兑乡,南至榆树湾村附近,东临黄河,长50 km,宽30 km,面积1500 km²,煤炭已探明储量280亿t,高岭土概算储量56亿t。准格尔煤田蕴藏着丰富的煤炭资源,同时太原组、山西组含煤岩系中发育的高岭土矿层多达十个层段,资源储量可观(李炳云,1999;王荣,2013),预测高岭土资源量近60亿t。

4.5.3 江西瑞金老安背高岭土远景区FHA29

位于江西瑞金南西的谢坊镇,与会昌县交界

处,地处赣中南褶皱隆武夷隆起东部,邵武—河源北东向断裂带与大余—会昌东西向构造带交汇部位(吴燕荣,2011)。区内花岗岩分布广泛,属燕山早期多阶段岩浆侵入形成的珠兰埠复式花岗岩体的组成部分。岩体侵入于震旦、寒武系浅变质岩,为白垩系红盆所覆盖。燕山早期第一阶段岩浆侵入形成花岗岩岩基,第二、第三阶段形成规模较小的花岗岩岩株、岩枝或岩瘤。晚期有中基性、酸性脉岩形成。区内构造发育,北东—北北东向、东西向及北西向断裂,形成规模大小不等的硅化带、角砾岩带或碎裂岩带。北北东向河源—邵武深大断裂,控制着区内燕山期花岗岩体,白垩系红盆的形成与分布。断裂性质大多表现为早期压性为主,后期逐渐转化为张扭或拉伸性质,控制着区内矿床的分布。主要矿产有铀、稀土、萤石、高岭土等,区内矿床的形成和分布,与区内特定的地质构造背景关系

密切,也反映了区内良好的成矿地质条件。

4.5.4 广西合浦县高岭土矿远景区 FHA2

本区大地构造位置为南华准地台云开台隆、钦州残余地槽和北部湾拗陷3个二级构造单元的相邻部位,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。区域地层:以第四系和志留系为主,另有泥盆系、石炭系、白垩系和古近系—新近系。志留系主要分布于东南部和西北部。第四系广泛分布于区域中北部、西部和南部。区域构造:褶皱主要有大田平背斜和公馆向斜;断裂构造主要为北东向和东西向,韧性变形构造比较发育,尤以花岗岩受动力构造作用的现象最为明显。岩浆岩主要为加里东晚期侵入的花岗岩体,次为燕山期花岗岩。矿区内岩石蚀变现象非常普遍,主要为高岭石化,次为硅化、绢云母—白云母化、褐铁矿化、绿泥石化等,矿化规模大,找矿远景及资源量可观。

4.5.5 福建省大田高岭土远景区 FHB2

远景区位于福建省大田县建设镇境内,地处闽西南华力西—印支拗陷带之大田—龙岩拗陷的东北部。区域上位于闽西南华力西—印支拗陷带之大田—龙岩拗陷的东北部,强烈的燕山运动波及,致使地壳强烈的褶皱,断裂发育,断裂沟通深部岩浆源,导致强烈的火山活动和岩浆侵入。区内岩浆活动强烈,燕山晚期侵入的花岗岩(汤泉岩体),分表现为多期次的侵入叠合,主要为燕山晚期侵入的花岗闪长岩,即汤泉岩体。区内构造主要以北东向断裂为主。本区岩浆岩分布极为广泛。主要有石英斑岩和花岗闪长岩,其中石英斑岩经风化后形成本区矿床,而花岗闪长岩为本区矿体围岩(林俊英,2018)。近些年来在该区持续开展了矿产勘查工作,已发现金属矿、非金属矿多处,高岭土矿床主要为燕山晚期侵入的花岗岩(主要为石英斑岩)风化蚀变而成,矿化规模大,找矿远景及资源量可观。

4.5.6 安徽省庐枞盆地高岭土远景区 FHA22

庐枞盆地位于扬子板块西北缘,西邻郟(城)—庐(江)断裂带,盆地是以中、下侏罗统陆相碎屑岩建造为基底,经燕山运动而发育起来的陆相继承性火山岩盆地。盆地内断裂构造发育,岩浆活动频繁,矿化作用强烈,矿产资源丰富,是长江中下游地区一个重要的铁、硫、铜、铅、锌、明矾石等矿集区(吴旭升,

2016)。庐枞盆地高岭土矿主要分布于盆地北部,赋存于下白垩统龙门院组、砖桥组地层和粗安玢岩中的断裂构造带中及两侧。根据高岭土矿的成矿地质条件及成矿规律分析认为,庐枞盆地北部高岭土矿的成矿地质条件好,高岭土矿点多,找矿潜力大。

4.5.7 徐州陈楼—马庄矿区高岭土远景区

本区属于煤系高岭土,位于华北石炭—二叠纪聚煤区,从石炭纪到二叠纪,整个华北的地壳活动性逐渐增强,表现了大规模海退,物源区剥蚀加剧,沉积速度加快。研究区早二叠世晚期古地理类型为三角洲平原、河漫、湖泊以及三角洲分流间湾分布广泛,又因为气候温热,为物源区铝硅酸盐矿物化学风化提供了良好的条件,即为高岭石形成创造了物质基础(严家平,1995),这一特定的地质背景对高岭土矿床的形成起到了控制作用。

4.5.8 福建省安溪县高岭土远景区 FHA16

该区位于福建省安溪县西南部,高岭土矿床赋存于地表浅部,其分布严格受地形地貌、成矿原岩及风化程度控制,具有明显的风化残余矿床特征。周边广泛分布的赤水组地层为高岭土矿床的形成提供了有利的“先天性”建造条件;后期断裂构造则从控矿、成矿方面为高岭土矿床的形成提供了另一重要条件;本区气候属亚热带海洋性季风气候,雨量充沛,有利于矿区植被繁殖生长、腐烂分解,避免风化壳的水土流失(兰启发,2013)。从本区建造和改造相得益彰的成矿特点,显示了矿区成矿条件十分配套,具有很好的找矿前景。

4.5.9 福建龙岩高岭土远景区 FHA7

该区地处华南陆壳边缘,其东南隔台湾(岛弧的一部分)与太平洋板块(洋壳)相接。岩浆岩的分布与性质受太平洋板块俯冲带的活动所控制。区内岩浆岩以酸性和中酸性岩类为主,分多期、多次侵入。该区地处中国东南沿海亚热带气候带,湿热多雨,植物繁茂,腐殖质丰富,使水介质经常保持在酸性和中酸性条件下,岩石的化学风化进行得相当强烈。区内断裂构造很发育,有利于风化成矿(张天乐,1996)。另外,本区为低山丘陵和山谷盆地,地貌平缓,剥蚀作用甚微,这样的自然地理条件,有利于风化残余高岭土的保存。

4.5.10 福建宁化高岭土远景区 FHA29

位于闽西北隆起带与闽西南拗陷带交接部位,处

于武平—光泽北北东向断裂带与宁化—南平北东向构造岩浆带交汇部位,光泽—建宁—宁化成矿带西南端。本区属于低山—丘陵地貌类型,地形切割中等,自然坡度 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$,有利于植被生长,同时也有利于地表水的流泄,促进水介质将碱金属等不断带出,进一步促进风化作用和矿体的贮存。本区具有亚热带温和湿润的气候、舒缓的地貌,这些为高岭土矿的形成提供了持续的、稳定的风化成矿条件。区域内矿产资源比较丰富,已发现的非金属矿产主要有高岭土、萤石、脉石英、钾长石等,成矿地质条件良好。区内已探明高岭土矿石量82万t,瓷石矿石量70.39万t(陈伟,2018)。该区域南段尚未进行相关工作,但不排除其存在高岭土矿及瓷石矿的可能,建议进行相关地表工作,发现相关矿化点时,进行地表槽探、深部钻探等揭露工程,扩大规模,增加资源量。

5 结 论

本次高岭土矿产资源潜力评价是基于中国高岭土成矿规律研究基础上,对其划分预测类型、总结成矿模式、归纳预测要素,最后对高岭土矿远景区进行了划分并估算了资源潜力,并对其中10个重要A类远景区进行了详细评述。总体来说,中国高岭土矿资源丰富,分布广泛,潜在资源量巨大。通过开展全国高岭土矿产资源潜力评价,得出如下结论:

(1) 风化型和热液蚀变型高岭土矿远景区有69个,预测资源量72.22亿t,主要分布在华南亚热带季风气候区,该区域气候湿润,植被繁茂,具备岩石风化蚀变的有利条件。区域上复杂密集的断裂构造,为热液活动提供了良好的通道和空间;后期的断裂使岩体碎裂,发生物理风化,加快了岩石的化学风化作用;深大断裂使岩石的风化作用进入矿体深部,形成更大矿体,同时加强山顶、山脊及缓坡等地段对富含长石、少暗色矿物的白云母花岗岩的勘查工作,对于寻找优质高岭土矿有重要意义。

(2) 沉积型煤系高岭土远景区有109个,估算资源量608亿t,该类型高岭土是中国特有的,十分可贵的非金属矿产资源,该类型矿产主要分布在中国东北、西北等主要产煤区。

(3) 到目前为止,煤系高岭土的利用力度还不够大,中国煤矸石利用率仅达30%~40%,主要原因是技术不完善,环境污染严重,大量堆积的煤矸石

还侵占了越来越多的耕地,构成了对生态和环境的三重破坏。煤系高岭土的开发和利用,不仅可以解决中国优质高岭土的匮乏问题,可以使得中国成为世界第一大高岭土资源国,而且使以往作为煤矸石而排放的煤系高岭土资源获得充分开发利用,所以中国煤系高岭土的规模化加工利用具有重大的社会与经济意义。建议今后开展煤系高岭土资源综合利用及循环经济鼓励煤矸石加工技术的提高和完善,并开展技术的大规模推广。

致谢:文章完成过程中得到了陈郑辉、叶会寿、娄德波、王成辉、李立兴等同事的咨询和帮助,在此表示衷心的感谢。

注释

① 自然资源部信息中心.2016.世界矿产资源年评[R].

② 自然资源部信息中心.2020.中国矿产资源报告(2020)[R].

References

- Chen Wei. 2018. Geological characteristics and genesis of kaolin ore in Qingyao mining area of Ninghua, Fujian province[J]. *Jiangxi Building Materials*, (1): 177-179 (in Chinese).
- Chen Kaihui. 1984. Genesis of Kaolin deposits in China[J]. *Science in China, (Series B)*, (2): 166-174 (in Chinese).
- Chen Tao, Wang Huan, Zhang Zuqing, Wang Hejin. 2003. Clay minerals as indicators of paleoclimate[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(4): 416-420 (in Chinese with English abstract).
- Cui Zhaoyue. 2008. Non-metallic Mining in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 112 (in Chinese).
- Fujian Bureau of Geology and Mineral Resources. 1985. Regional Geology of Fujian Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 381 (in Chinese).
- Guan Tielin. 1982. Discussion on geological characteristics and genesis of Xuyong type kaolin deposit[J]. *Mineral Deposits*, (2): 69-79 (in Chinese with English abstract).
- Huang Changsheng, Zhao Yun, Zhang Shengnan, Wang Jietao, Liu Fengmei, Gong Chong, Yi Chengyun, Li Long, Zhou Hong, Wei Liangshuai, Pan Xiaodong, Shao Changsheng, Li Yiyong, Han Wenjing, Yin Zhibin, Li Xiaozhe. 2021. Groundwater resources in the Yangtze River Basin and its current development and utilization[J]. *Geology in China*, 48(4): 979-1000 (in Chinese with English abstract).
- Kong Deshun. 2014. Progress in coal Kaolin deposits and its application[J]. *Technology & Development of Chemical Industry*, 43(7): 39-41 (in Chinese).
- Lan Qifa. 2013. Geological characteristics and genesis of Kaolin deposit in Xiyang mining area, Anxi County, Fujian Province[J]. *Resource and Environment*, (4): 111-113 (in Chinese).
- Li Bingyun. 1999. Preliminary study on development strategy of kaolin

- mining area in eastern Zhungeer coalfield, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 268(9): 37–39 (in Chinese).
- Li Guodong, Yin Yaoyu, Lu Rui, Han Cong, Wei Dezhou, Shen Yanbai. 2018. Purification process and application progress of Kaolin[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 4: 142–150(in Chinese with English abstract).
- Li Tong, Yuan Huaiyu, Wu Shengxi, Chen Xianfu. 2000. On the geotectonic petrochemical regionalization of granitoids in China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 24(3): 202–207(in Chinese with English abstract).
- Liao Zhijie, Zhang Zhenguo. 1989. Geothermics of Southern Tibet[J]. *Geology Reviews*, 35(4): 366–373(in Chinese with English abstract).
- Lin Chen. 2001. A preliminary study on the water-bearing characteristics of weathered vein kaolin deposit in Fujian coastal area [J]. *Fujian Coal Geology*, (2): 48–49(in Chinese).
- Lin Junying. 2018. Study on genesis and metallogenic regularity of Menglong Kaolin deposit in Datiancao, Fujian Province [J]. *Energy and Environment*, (2): 32–34(in Chinese).
- Liu Yang, Chen Zisheng. 2020. Modification and application of Kaolin Clay[J]. *China Ceramics*, 56(3): 74–78(in Chinese with English abstract).
- Meng Yuhang, Shang Xi, Zhang Qian, Yang Huaming. 2019. Functional modification of Kaolin and its strategic application[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 39(6): 69–76 (in Chinese with English abstract).
- Miao Xiangliang, Dong Zou, Li Liu. 2014. Summary of faolin deposit types and distribution in China[J]. *Advances in Geosciences*, 4: 166–172(in Chinese with English abstract).
- Ren Ruichen, Rong Zhenwei, Song Jinhu, Pang He. 2016. Experimental study on chemical bleaching of kaolin in coal measures [J]. *Non-metallic Ore*, 39(2): 86–87(in Chinese with English abstract).
- Ren Ruichen, Chen Kang, Li Chenglong, Li Weichao, Gao Enxing. 2017. Purification and whitening of coal associated Kaolin deposits[J]. *Non-metallic Ore*, 40(2): 55–58(in Chinese with English abstract).
- Robert J P. 2016. Kaolin deposits and their uses: Northern Brazil and Georgia, USA[J]. *Applied Clay Science*, 131: 1–13.
- Shen Jixue, Ma Hongwen. 2016. Research progress on Kaolin resources and Kaolin synthesis technology [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 35(4): 1150–1158(in Chinese with English abstract).
- Su Yanhua. 2016. Geological characteristics of weathering residual Kaolin deposit in Chaozhou area, Guangdong Province [J]. *Modern Mining*, 567: 160–177(in Chinese).
- Wang Shulai. 2001. Kaolin Rock and its Processing and Utilization in Coal Measures of China [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press(in Chinese).
- Wang Niangong. 1984. On the internal relationship between granite weathering residual Kaolin deposits and landform [J]. *Non-metallic Ore*, (6): 1–4(in Chinese with English abstract).
- Wang Hao. 2013. Experimental Study on Process Mineralogy and Beneficiation of Sandy Kaolin Deposit[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Wang Genhou, Wang Xunlian, Yu Xinqi. 2008. Comprehensive Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 78–88(in Chinese).
- Wang Rong. 2013. General evaluation of Kaolin resources in Zhungeer coalfield, Inner Mongolia [J]. *Business Review*, (2): 142–143(in Chinese).
- Wang Shicheng, Meng Xianwei. 1993. Discussion on the prediction method of super-large ore deposits[J]. *Geology in China*, 24–27 (in Chinese).
- Wang Shuangming. 2011. Ordos basin tectonic evolution and structural control of coal[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(4): 544–552(in Chinese with English abstract).
- Wu Xusheng, Hu Yanqing. 2016. Discussion on metallogenic regularity, prospecting direction and development and application of kaolinite deposit in Luzong basin, Anhui Province[J]. *Geology in Anhui*, 26(1): 5–9(in Chinese).
- Wu Yanrong, Huang Fuzhen, Zhong Juntao. 2011. Ore-controlling factors analysis and prospecting prospect of Laoanbei Kaolin deposit in Ruijin, Jiangxi Province [J]. *West-China Exploration Engineering*, (1): 132–140(in Chinese).
- Xiang Maomu, Ma Zhongwei. 1986. Geological characteristics and genesis of kaolin deposits in the bottom of the Upper Permian in northern Guizhou and adjacent areas[J]. *Mineral Deposits*, 5(1): 73–78(in Chinese).
- Xiao Keyan, Sun Li, Yin Jiangning, Ding Jianhua, Niu Cuiyi, Chen Jianping, Yang Yiheng. 2014. The prediction and assessment of important mineral resources in China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 35(55): 543–541(in Chinese with English abstract).
- Xie Kuan. 1986. A preliminary study on the types and metallogenic regularity of kaolin (porcelain clay) deposits in southeast Zhejiang[J]. *Geology in Zhejiang*, 2(2): 40–48(in Chinese).
- Yan Jiaping, Li Yiliang. 1995. Geological characteristics and metallogenic conditions of kaolin deposit in Chenlou–Mazhuang mining area, Xuzhou[J]. *Anhui Geology*, 5(4): 46–50(in Chinese).
- Ye Zhanghuang, Yan Qiang, Wang Anjian, Li Yike, Wang Boshan. 2016. Geological characteristics and ore genesis of Yaokang kaoline deposit in Hepu, Guangxi[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(2): 207–213(in Chinese with English abstract).
- Yuan Youshen. 1984. Discovery of glandular debris, low temperature hydrothermal fluid and altered minerals in The Yangshan Kaolin deposit in Suzhou and new understanding of the genesis of the deposit[J]. *Acta Sedimentary Sinica*, 2(3): 40–48(in Chinese with English abstract).
- Zhang Tianle, Wang Zongliang. 1996. Geological characteristics and mineralization of the Longyan Kaolin Deposit[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 17(3): 292–301(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhifei, Zhang Mingtao. 1985. Estimation of Hydrothermal Geothermal Resources in Tibet [M]. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 160–176(in Chinese).
- Zhao Zhigen, Tang Xiuyi. 1998. Development and utilization of kaolin in coal[J]. *Geology in China*, (8): 31–32(in Chinese).
- Zheng Xiang, Ren Guogang, Zhang Dezhi, Wang Yufei, Huang Shiwei, He Yubo. 2018. Geological characteristics and genesis of Kaolin

- deposit in Shangyou Xiaozhaibei of Jiangxi[J]. Resources Environment & Engineering, 32(1): 41-47(in Chinese with English abstract).
- Zhong Heqing. 2014. Geological characteristics and metallogenic geological conditions of chayang Kaolin deposit in Nanping, Fujian Province[J]. Fujian Geology, 4(35): 297-305(in Chinese with English abstract).
- Zhu Rukai. 1997. Geochemical distinguishing marks of coal Kaolin rocks[J]. Geological Review, 43(2): 121-130(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xun, Yin Huiyu, Xiang Renjie, Han Xinmin, Cui Yuezhao. 1999. Mineral Information in China (Volume No.3), Nonmetallic Minerals [M]. Beijing: Science Press, 121-135(in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 陈伟. 2018. 福建宁化青瑶矿区高岭土矿地质特征及成因探讨[J]. 江西建材, (1): 177-179.
- 陈开慧. 1984. 我国高岭土矿床成因的特征[J]. 中国科学(B辑), (2): 166-174.
- 崔越昭. 2008. 中国非金属矿业[M]. 北京: 地质出版社, 112.
- 陈涛, 王欢, 张祖清, 王河锦. 2003. 黏土矿物对古气候指示作用浅析[J]. 岩石矿物学杂志, 22(4): 416-420.
- 福建省地质矿产局. 1985. 福建省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 381.
- 关铁麟. 1982. 叙永式高岭土矿床地质特征及其成因的探讨[J]. 矿床地质, (2): 69-79.
- 黄长生, 周耘, 张胜男, 王节涛, 刘凤梅, 龚冲, 易秤云, 李龙, 周宏, 魏良帅, 潘晓东, 邵长生, 黎义勇, 韩文静, 尹志彬, 李晓哲. 2021. 长江流域地下水资源特征与开发利用现状[J]. 中国地质, 48(4): 979-1000.
- 孔德顺. 2014. 煤系高岭土及其应用研究进展[J]. 化工技术与开发, 43(7): 39-41.
- 兰启发. 2013. 福建省安溪溪洋矿区高岭土矿床地质特征及其成因探讨[J]. 能源与环境, (4): 111-113.
- 李炳云. 1999. 内蒙古准格尔煤田东部煤系高岭土矿区带开发战略的初步研究[J]. 中国地质, 26(9): 37-39.
- 李国栋, 殷尧禹, 卢瑞, 韩聪, 魏德洲, 沈岩柏. 2018. 高岭土提纯工艺及其应用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 4: 142-150.
- 林晨. 2001. 福建沿海地区风化脉状高岭土矿床及其含水性特征初探[J]. 闽煤地质, (2): 48-49.
- 黎彤, 袁怀雨, 吴胜昔, 程先富. 2000. 中国花岗岩类的大地构造岩石化学区划[J]. 大地构造与成矿学, 24(3): 202-207.
- 林俊英. 2018. 福建省大田草孟垄高岭土矿床成因及成矿规律研究[J]. 能源与环境, (2): 32-34.
- 廖志杰, 张振国. 1989. 西藏南部地热[J]. 地质论评, 35(4): 366-373.
- 刘阳, 陈子升. 2020. 高岭土的改性及其应用研究[J]. 中国陶瓷, 56(3): 74-78.
- 孟宇航, 尚玺, 张乾, 杨华明. 2019. 高岭土的功能化改性及其战略性应用[J]. 矿产保护与利用, 39(6): 69-76.
- 缪向亮, 邹东风, 刘茜. 2014. 我国高岭土矿床类型与分布特征概述[J]. 地球科学前沿, (4): 166-172.
- 任瑞晨, 陈康, 李成龙, 李维超, 高恩星. 2017. 煤泥伴生高岭土提纯与增白试验研究[J]. 非金属矿, 40(2): 55-58.
- 任瑞晨, 荣振伟, 宋金虎, 庞鹤. 2016. 煤系高岭土化学漂白试验研究[J]. 非金属矿, 39(2): 86-87.
- 苏燕华. 2016. 广东潮州地区风化残积型高岭土矿床地质特征[J]. 现代矿业, 567: 160-177.
- 王树来. 2001. 中国煤系高岭岩(土)及加工利用[M]. 北京: 中国建材工业出版社.
- 王念功. 1984. 试论花岗岩类风化残余型高岭土与地貌之间的内在联系[J]. 非金属矿, (6): 1-4.
- 王浩. 2013. 砂质高岭土的工艺矿物学及选矿试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学.
- 王根厚, 王训练, 余心起. 2008. 综合地质学[M]. 北京: 地质出版社.
- 王世称, 孟宪伟. 1993. 关于超大型矿床预测方法问题探讨[J]. 中国地质, (3): 24-27.
- 申继学, 马鸿文. 2016. 高岭土资源及高岭石合成技术研究进展[J]. 硅酸盐通报, 35(4): 1150-1158.
- 王双明. 2011. 鄂尔多斯盆地构造演化和构造控煤作用[J]. 地质通报, 30(4): 544-552.
- 王荣. 2013. 内蒙古准格尔煤田高岭土矿产资源概略评价[J]. 企业导报, (2): 142-143.
- 吴燕荣, 黄符楨, 钟骏泰. 2011. 江西瑞金老安背高岭土矿控矿因素分析及找矿前景[J]. 西部探矿工程, (1): 132-140.
- 吴旭升, 胡艳青. 2016. 安徽省庐枞盆地高岭土矿的成矿规律、找矿方向及开发应用问题探讨[J]. 安徽地质, 26(1): 5-9.
- 肖克炎, 孙莉, 阴江宁, 丁建华, 牛翠祯, 陈建平, 杨毅恒. 2014. 全国重要矿产预测评价[J]. 地球学报, 35(55): 543-541.
- 严家平, 李义良. 1995. 徐州陈楼-马庄矿区高岭土矿床地质特征及成矿条件[J]. 安徽地质, 5(4): 46-50.
- 叶张煌, 闫强, 王安建, 李以科, 汪柏山. 2016. 广西合浦县耀康高岭土矿地质特征和矿床成因[J]. 桂林理工大学学报, 36(2): 207-213.
- 谢宽. 1986. 浙江东南地区高岭土(瓷土)矿床类型及成矿规律的初步探讨[J]. 浙江地质, 2(2): 40-48.
- 向茂木, 甘朝勋, 马忠魏. 1986. 黔北及邻区上二叠统底部高岭土矿床地质特征及成因[J]. 矿床地质, 5(1): 73-78.
- 袁又申. 1984. 苏州阳山高岭土矿床中玻屑、低温热液和蚀变矿物的发现以及对矿床成因的新认识[J]. 沉积学报, 2(3): 100-109.
- 张天乐, 王宗良. 1996. 龙岩高岭土矿床地质特征及成矿作用[J]. 地球学报, 17(3): 114-122.
- 张知非, 章铭陶. 1985. 西藏水热型地热资源的估算[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 160-176.
- 赵志根, 唐修义. 1998. 煤系高岭土的开发和利用[J]. 中国地质, (8): 31-32.
- 朱如凯. 1997. 煤系高岭岩的地球化学判别标志[J]. 地质论评, 43(2): 121-130.
- 郑翔, 任国刚, 张德志, 王宇飞, 黄实卫, 何玉波. 2018. 江西上犹小寨背高岭土矿床地质特征及矿床成因[J]. 资源环境与工程, 32(1): 41-47.
- 钟和清. 2014. 福建南平茶洋高岭土矿床地质特征及成矿地质条件[J]. 福建地质, 4(35): 297-305.
- 朱训, 尹惠宇, 项仁杰, 韩新民, 崔越昭. 1999. 中国矿情(第三卷) 非金属矿产[M]. 北京: 科学出版社, 121-135.