

中国高岭土矿床时空分布规律

吴宇杰¹⁾, 陈从喜^{1, 2)*}, 袁 峰¹⁾

1) 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009; 2) 自然资源部信息中心, 北京 100036

摘 要: 中国高岭土矿产资源丰富, 矿床类型齐全且分布广泛, 是一种重要的战略性非金属矿产。前人对高岭土矿床研究、地质勘查和资源开发利用都做了大量工作, 积累了丰富资料, 但缺少对高岭土矿床成矿和时空分布规律系统性的分析。本文在前人研究和在全国现有高岭土矿床和地质勘查资料系统分析基础上, 选取了有代表性且数据比较齐全的 521 个高岭土矿床, 以 GIS 空间分析为手段, 详细研究了中国高岭土矿床的空间分布特点, 绘制了中国高岭土成矿区带分布图, 分析了中国高岭土矿床时空分布规律, 为矿产资源空间分析建模和高岭土资源潜力评价提供了理论方法和依据。研究结果表明, 中国高岭土矿床成因类型以风化型和沉积型为主, 成矿时代以中、新生代最为重要; 高岭土矿床集中分布在广东、广西、福建、陕西、江西、江苏等 6 省份; 其中风化型高岭土矿床主要分布在华南地区, 沉积型高岭土矿床以华北地区为主。在找矿方向上, 南方易寻找风化残积亚型高岭土, 北方宜寻找煤系沉积亚型高岭土; 而热液蚀变型高岭土矿床有由南向北逐渐增多的趋势, 寻找这类矿床可适当往北转移。

关键词: 高岭土; 矿床类型; 空间分析; 成矿规律; 非金属矿产; 战略性矿产

中图分类号: P619.232 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.091101

Temporal-spatial Distribution Regularities of Kaolin Deposits in China

WU Yu-jie¹⁾, CHEN Cong-xi^{1, 2)*}, YUAN Feng¹⁾

1) School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009;

2) Information Center of Ministry of Natural Resources, Beijing 100036

Abstract: Kaolin is an important strategic industrial mineral that is abundantly and fully ranged in categories and widely distributed in China. Previous researchers have made great efforts to investigate the cause of formation of the kaolin deposit and to conduct geological survey and exploration for development and utilization of kaolin resources, in which huge quantities of data have been accumulated, but these data lack a systematically and accurately quantitative analysis and conclusion towards mineralization and temporal-spatial distribution regularities of kaolin deposits. On the basis of previous studies and systematic analysis of the existing kaolin deposits and geological exploration data in China, the authors selected 521 representative kaolin deposits with relatively complete data, studied the spatial distribution characteristics of China's kaolin deposits in detail by means of GIS spatial analysis, drew the distribution map of China's kaolin metallogenic belt, and analyzed the temporal and spatial distribution of China's kaolin deposits. The results provide a theoretical method and basis for spatial analysis and modeling of mineral resources and evaluation of kaolin resource potential. It is shown that the genetic types of the deposits in China are mainly weathering type and sedimentary type, and the most important metallogenic epochs occurred in Mesozoic and Cenozoic. Kaolin deposits are mainly distributed in Guangdong, Guangxi, Fujian, Shaanxi, Jiangxi and Jiangsu, the weathering type kaolin deposits are mainly distributed in South China, and the sedimentary type kaolin deposits are mainly distributed in North China. In terms of

本文由中国地质调查局地质调查项目“中国矿产地质志”(编号: DD20190379)资助。

收稿日期: 2020-07-20; 改回日期: 2020-09-04; 网络首发日期: 2020-09-12。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 吴宇杰, 男, 1997 年生。硕士研究生。研究方向为地球信息科学。E-mail: yujiewu1@foxmail.com。

*通讯作者: 陈从喜, 男, 1963 年生。博士, 研究员。主要从事矿床学和资源分析研究。E-mail: cxchen@infomail.mnr.gov.cn。

prospecting direction, the weathering residual sub-type kaolin deposits are easy to be found in South China, and the coal-bearing sedimentary sub-type kaolin deposits should be found in North China. There exists a tendency that hydrothermal alteration kaolin deposits are gradually increasing from South China towards North China, thus the prospecting for hydrothermal alteration kaolin deposits could be transferred towards North China accordingly.

Key words: kaolin; type of deposits; spatial analysis; mineralization disciplines; industrial minerals; strategic minerals

高岭土是以中国江西省景德镇市东 45 km 的高岭村命名的矿种。中国是世界上最早制作瓷器的国家,而高岭土在古今制瓷方面起了关键的作用,是一种重要的工业矿物、战略性矿产,或“关键矿产”(郑直等,1980;陈其慎和王高尚,2007;汪灵,2019)。中国高岭土虽然有着悠久的开发利用历史,但对高岭土矿床地质学、矿物学的研究和地质勘查却始于 20 世纪 30 年代。如侯德封(1931)对河北彭城镇黏土的调查,李悦言(1941)对四川叙永黏土的调查。章人骏(1947)对江西景德镇高岭土的研究,唐衡楚等(1957)对江西浮梁、星子等处高岭土的研究,沈永和(1957)对内蒙古大青山“高岭岩”的研究。陶维屏(1966)、方邳森和胡立勋(1980)对高岭土矿床地质的研究,彭琪瑞等(1963)、陈开惠(1984)对高岭土矿物的研究,陶维屏等(1984)对中国高岭土矿床进行了系统性论述,指出中国高岭土大多数分布在中国东部和南部,形成时间上 70%以上形成于中、新生代,近 60%的矿床赋存于中、新生代岩体中,并总结了高岭土矿床的成因类型与成矿模式。与此同时,我国地勘队伍对高岭土矿开展了地质勘查工作,到目前为止发现并勘查、开发利用了 500 多个高岭土矿床,分布于全国 26 个省(区、直辖市)。总的来看,前人对中国高岭土矿床研究做了大量工作,主要集中在矿床地质特征及成因、地球化学、成矿规律及开发利用方面,但限于掌握数据有限,缺少全国范围基于大量统计数据的时空性计量分析。鉴于此,在前人研究的基础上,本文采用地球信息科学的空分析方法,以可获得的大量地质勘查成果和矿床资料为对象,研究全国高岭土矿床的时空分布规律,以时间演化规律求证已知空间分布的合理性,推测未知空间区域成矿的可能性,对高岭土矿床学研究、成矿预测和找矿勘查具有重要的理论和实践意义。

1 中国高岭土矿床空间分布规律

依照《中国成矿区带划分方案》(陈毓川等,2006;徐志刚等,2008)对成矿区带划分和研究的要求及原则,在综合研究并总结中国高岭土矿成矿规律基础之上,确定了中国高岭土矿成矿区带划分方案。全国高岭土矿床共划分出 4 个成矿域、13 个成矿省和

44 个 III 级成矿区带(表 1)。按各成矿区带矿床数量从多到少,前十名成矿区带依次为:武功山—杭州湾、浙闽粤沿海、江南隆起东段、南岭、永安—梅州—惠州、长江中下游、粤西—桂东南、山西(断隆)、海南、钦州(残海)高岭土成矿带。

1.1 中国高岭土矿床在成矿域上的分布规律

成矿域,是指全球性的成矿区带(陈毓川,1999),应大致对应于构造域,受控于统一的全球性构造及受控之动力学体系。按照中国成矿作用特点,中国高岭土矿产地共划定 4 个成矿域,即古亚洲、秦祁昆、特提斯、滨太平洋成矿域(陈毓川等,2006;徐志刚等,2008)。中国高岭土矿床主要分布在古亚洲成矿域和滨太平洋成矿域。

古亚洲成矿域主要以新时代碎屑岩建造沉积型高岭土矿床和古生代—中生代含煤建造沉积型高岭土矿床为主。滨太平洋成矿域由于活跃的成矿作用,形成了各类高岭土矿床,尤其是花岗岩类风化型高岭土矿床规模宏大,这类矿床主要分布在长江以南地区。具体到各细分类型矿床来说,细粒酸性脉岩风化型矿床分布较广,华北、华东、中南都有。这些细粒酸性脉岩主要是燕山期的,在第四纪风化成矿。其中以侵入于富铝岩层中的细粒酸性脉岩矿化最佳。凝灰岩风化型矿床与凝灰岩蚀变型矿床都与晚侏罗纪凝灰岩有关。凝灰岩风化型矿床主要分布在长江以南,东经 115°以东的沿海和雨量充沛,气候湿热而地势低平的内地。其控矿因素基本上与花岗岩-伟晶花岗岩风化型矿床相似,但因其母岩较花岗岩致密因而风化难度较大,故目前在长江以北此类矿床少见(陶维屏等,1984,1994)。

1.2 中国高岭土矿床在成矿省上的分布规律

按区域成矿学的理论,成矿省内应出现过一或几个与区域成矿作用相对应的大地构造-岩浆旋回,其内部出现几个与构造-岩浆旋回有成因联系的矿化类型组合并叠加一体的成矿单元,在地质历史演化过程中,成矿物质的富集受地壳物质不均匀性的控制,即地壳物质占主导地位,矿床富集在大体构造单元的特定部位,或与特定的地质体有成因联系。中国区域可划分出 16 个 II 级成矿区带(陈毓川等,2006;徐志刚等,2008)。其中,与高岭土分布有关的有 13 个成矿省,包括 II-1 阿尔泰成矿省;II-2

准噶尔成矿省; II-3 伊犁成矿省; II-4 塔里木陆块成矿省; II-5 祁连成矿省; II-6 昆仑成矿省; II-7 秦岭—大别成矿省; II-10 冈底斯—腾冲成矿省; II-12 内蒙古—大兴安岭成矿省; II-13 吉黑成矿省; II-14 华北陆块成矿省; II-15 扬子成矿省; II-16 华南成矿省(含台湾岛和海南岛)。高岭土矿床集中分布在华北陆块成矿省、扬子成矿省、华南成矿省这 3 个二级成矿单元里(图 1)。

华北陆块成矿省记录了中国最古老地壳的形成过程,也孕育着中国最古老的高岭土矿床,涵盖了我国 90%最具特色、未来也是最具开发潜力的煤系高岭土。华北陆块在寒武—奥陶纪形成碳酸岩台地形,以碳酸盐岩为主夹少量细碎屑岩的浅海陆架沉积广布,构成了陆块区的盖层。奥陶纪到早石炭纪,华北陆块区整体抬升上隆成剥蚀区,大规模的碳酸盐岩侵蚀面为后续煤系高岭土矿床的形成提供先决条件。晚石炭纪—早二叠纪发育陆表海沉积,中二叠纪到中三叠纪为陆相沉积,煤系高岭土矿床也主要为陆相沉积。

以陕西府谷县高岭土为例,高岭土矿层主要赋存于中晚石炭世及早二叠世煤系地层中,与煤矿层密切共生,且多数构成煤层底板。高岭土矿含矿岩系包括本溪组、太原组、山西组,各组段沉积特征不尽相同,生成古环境也有所区别,其中本溪组岩层是(泻湖)潮坪环境下形成的,具明显的填平补齐的沉积特点。太原组岩层总体为受海侵影响的下三角洲平原古环境,含矿层具分流间湾沉积亚环境特征,高岭土矿层是这种亚环境的沉积物。良好的泄水环境导致黏土一年中几个月时间暴露在大气中氧化,形成高岭石。海则庙矿层位于山西组下部第一沉积旋回。矿层形成于曲流河岸后洼地-湖泊中,洪泛期含黏土河水进入岸后湖沼,黏土类碎屑会渐渐沉积下来,静水期水位下降,这些物质暴露于空气中氧化,黏土转化为高岭土(张炳社等, 2013)。

而扬子成矿省相对于华北华南成矿省,最具研究和开发价值的应是热液蚀变型高岭土,该地区热液蚀变型高岭土矿床占此类矿床总数量 50%以上,在安徽庐江、马鞍山、繁昌一带,与苏州阳山一带广泛分布,在赣东北地区也有零星散布。此种高岭土质地优良,在我国高岭土工业上占据及其重要的地位(陶维屏, 1989; 陶维屏等, 1994)。

以江苏苏州高岭土矿床为例,按其成因、产出空间位置及顶底板围岩特征,可分成三个矿床类型,即阳西式、观山式、通安式。阳西式为热液蚀变叠加后期改造型矿床。矿床产出空间位置,受逆推断裂和剥蚀面复合构造控制。矿床规模一般为大-中型。属此类矿床的有阳西矿、五龙山矿等。观山式

为热液蚀变型,局部地段属叠加后期改造型。矿床产出空间位置,主要受剥蚀面控制。顶板为火山岩,底板为二叠—三叠系灰岩(砂页岩),矿床规模一般为大型。属于该类矿床的有观山、戈家坞及沙墩头等。通安式为热液蚀变型矿床,受张性断裂控制,常呈脉状穿插于火山岩中,局部在泥盆系砂岩断裂裂隙中见及。矿床规模一般为中-小型,原岩多为次英安斑岩、石英正长斑岩、花岗斑岩、石英斑岩等脉岩,经热液蚀变、强烈高岭土化而成(陶维屏等, 1984; 李灿华和范斯, 1988; 方邳森和方金满, 1990)。

华南成矿省是我国高岭土矿床分布最多的地区,查明资源储量上占据了我国高岭土总查明资源储量 50%以上,发现大小矿点多达 700 余处,成因类型从风化型,到热液蚀变型、煤系沉积型都有,几乎涵盖我国所有的成因类型,是我国高岭土资源最丰富也是开发程度最大的地区,仅广西合浦一地的高岭土查明资源储量就约占全国高岭土查明资源储量的 1/4。最典型的也是最主要的矿床类型是风化残积形成的高岭土(周国平和林毓川, 1991a, b)。

以广西合浦耀康高岭土矿区和十字路高岭土矿区为例,耀康高岭土矿区和十字路高岭土矿区赋存于加里东晚期钾长花岗岩风化壳内,矿体呈层状、似层状产出,覆盖于花岗岩之上。矿石自然类型可分为土状高岭土和残余块状高岭土两种。按颜色可分为白-灰白色高岭土和杂色高岭土。矿石的工业类型均属砂质高岭土。耀康矿区和十字路矿区查明资源储量规模均为大型,耀康矿区矿石质量指标中含 Fe_2O_3 、 TiO_2 稍高,而十字路矿区由于矿床风化不全,个别矿段原矿质量比较差(熊培文, 1991; 许富安, 2009),对高岭土质量影响较大。

1.3 中国高岭土重要矿集区

参考以往矿集区划分的一般原则和金属矿床矿集区研究的实践(徐志刚等, 2008; 陈建平等, 2013; 应立娟等, 2014; 李建康等, 2014; 高兰等, 2014),本文高岭土矿集区划分的原则是: (1)同一大地构造分区内,高岭土矿集区在各自 III 级成矿区带内圈定; (2)矿集区内包含不同成因类型矿床,有详(普)查以上工作程度并提交有资源查明资源储量的 2 处大型以上高岭土矿床;或有 1 处大型高岭土矿床,并在其周边有若干个中型、小型矿床(点)集中分布。 (3)矿集区边界、轮廓、走向按 III 级成矿区带走向分布情况而定。

按照上述矿集区划分原则,结合高岭土矿床成矿时代和成因类型,将中国高岭土聚集区划分出 14 个矿集区。高岭土矿集区的命名原则是地名+成因类型+高岭土矿集区。按 III 级成矿区带顺序从西

表 1 中国高岭土矿床成矿区带基本特征
Table 1 Basic characteristics of metallogenic belts of kaolin deposits in China

成矿域	成矿省及 编号	III 级成矿区带		
		成矿区带及编号	主要成矿特征	典型矿床
I-1	II-1 阿尔泰成矿省	III-2 南阿尔泰高岭土成矿带	分布在阿勒泰地区哈巴河县一带, 上新世一下更新世沉积成矿, 似层状、层状沉积, 砂质、含砂软质和软质高岭土。小型	新疆哈巴河县阿克托别高岭土矿
	II-2 准格尔成矿省	III-4 唐巴勒—卡拉美丽高岭土成矿带	分布在塔城地区额敏县一带, 为含铝高的粉砂质、泥质岩石经华力西晚期热液蚀变而成。小型优质高岭土矿床	新疆额敏县达因苏高岭土矿
		III-5 准噶尔盆地高岭土成矿带	分布于新疆阜康市一带, 早中侏罗世成矿, 层状沉积砂质高岭土矿床。小型	阜康市臭煤沟高岭土矿
	II-3 伊犁成矿省	III-10 伊犁地块高岭土成矿带	分布在天山西段, 高岭石-迪开石矿床, 早志留世成矿, 热液脉状矿床。小型	伊宁县铁列克萨依高岭石-迪开石矿区
I-2	II-4 塔里木成矿省	III-12 塔里木板块北缘高岭土成矿带	分布在塔里木板块北缘乌恰县、库尔勒市一带, 早中侏罗世成矿, 沉积层状砂质高岭土矿床。小型	乌恰县托云一带陶瓷用高岭土矿, 库尔勒市塔什店高岭土矿
	II-5 阿尔金—祁连成矿省	III-22 南祁连高岭土成矿带	分布在祁连褶皱带中南段大通盆地侏罗系第 4 煤组之下的砂岩中, 分布有湖沼相沉积型砂质高岭土矿床。中型	青海大通县尔麻砂质高岭土矿床
	II-7 秦岭—大别成矿省	III-66 东秦岭高岭土成矿带	分布于陕西略阳一带, 高岭土矿体产于志留系大河店组灰岩的溶洞中	陕西略阳白水江高岭土矿床
I-3	II-9 喀喇昆仑—三江成矿省	III-38 昌宁—澜沧高岭土成矿带	分布在云南临沧县, 第四纪沉积成矿, 1 座大型 2 座小型高岭土矿	云南临沧博尚高岭土矿, 云南临沧永泉高岭土矿
		III-39 宝山高岭土成矿带	分布于宝山龙陵县, 第四纪风化残积成矿。2 座小型高岭土矿	云南龙陵镇安东门高岭土矿, 龙陵龙新黄草坝高岭土矿
	II-10 冈底斯—腾冲成矿省	III-42 班戈—腾冲高岭土成矿带	分布于云南腾冲一带热泉群附近, 第三系中新统南林组, 为风化沉积叠加近代热泉蚀变的复合型矿床。矿石优质, 规模小型	云南腾冲沙坡高岭土矿床
		III-43 拉萨地块高岭土成矿带	分布在西藏当雄县一带第四系沉积物, 经火山热液蚀变形成不规则矿床, 矿石品位低, 规模小型	西藏拉萨市当雄县羊八井瓷土矿
I-1 + I-4	II-12 大兴安岭成矿省	III-50 突泉—翁牛特高岭土成矿带	分布在内蒙古扎赉特旗一带, 侏罗系上统流纹质凝灰岩蚀变成硬质高岭土。小型	内蒙古扎赉特旗黄宝山高岭土矿床
	II-13 吉黑成矿省	III-51 松辽盆地高岭土成矿带	分布于黑龙江北部依安县-讷河县一带, 中更新世河湖相沉积成矿, 砂质高岭土。大型-中型	黑龙江依安县红星高岭土矿床, 黑龙江讷河县全胜高岭土钾长石石英砂矿
		III-55 吉中—延边高岭土成矿带	分布于吉林中部磐石市一带, 早三叠市沉积和热液蚀变成矿。大型-中型	吉林省磐石市新立屯高岭土矿, 吉林省磐石市富太高岭土矿
	II-14 华北成矿省	III-56 辽东高岭土成矿带	分布于辽东丹东东港市、吉南白山市长白县一带, 石炭纪—二叠纪煤系沉积、晚侏罗世热液蚀变成矿和元古代混合岩第四纪风化残积成矿, 大、中型砂质高岭土矿为主	吉林江源县浑江煤田砬子煤矿立井高岭土矿, 吉林长白县马鹿沟高岭石矿, 辽宁东港市万宝高岭土矿
		III-57 华北陆块北缘东段高岭土成矿带	分布于内蒙古东部赤峰-通辽、河北宽城、辽西凌源—建平一带, 晚侏罗世热液蚀变和风化淋滤成矿, 中、小型高岭土矿为主	内蒙古宁城县忙农镇东沟丘高岭土矿, 辽宁建平县北二十家子镇大地萤石矿
		III-58 华北陆块北缘西段高岭土成矿带	分布于陕西省北部、内蒙古兴和县、商都县一带, 为石炭纪沉积大型砂质高岭土, 和晚侏罗世热液蚀变中型高岭土矿	内蒙古兴和县魏家沟矿区膨润土矿高岭土矿
		III-18 阿拉善高岭土成矿带	在祁连加里东地槽褶皱系走廊过渡带东端, 石炭系下统臭牛沟组分布有沉积型高岭土矿床, 并与铁、石墨矿产共生。大型	内蒙古阿拉善左旗闫地拉图高岭土矿床
		III-59 鄂尔多斯西缘高岭土成矿带	分布于内蒙古乌海市一带, 早二叠世煤系沉积成矿, 大型-中型高岭土矿	内蒙古乌海市海勃湾区木耳沟硬质高岭土矿
		III-60 鄂尔多斯盆地高岭土成矿区	分布于内蒙古鄂尔多斯盆地, 乌海市—鄂尔多斯市一带, 晚石炭世—早二叠世海陆交互相煤系, 早中侏罗世陆相煤系沉积成矿, 中小型高岭土矿	内蒙古准格尔旗脑包湾沟高岭土矿, 内蒙古清水河县桑林坡矿区高岭土矿
		III-61 山西高岭土成矿带	分布于内蒙古清水河县, 山西大同、浑源、怀仁、山阴、朔县、河曲, 河北邯郸等地晚石炭世—早二叠世煤系沉积成矿, 大中型高岭土矿为主	山西大同高岭土矿, 河北邯郸市车辋口—姬庄高岭土矿

续表 1

成矿域	成矿省及 编号	III 级成矿区带		
		成矿区带及编号	主要成矿特征	典型矿床
I-1 + I-4	II-14 华北成 矿省	III-63 华北陆块南缘高 岭土成矿带	分布于河南焦作市、嵩县、济源市,河北邯郸市等地,中石炭世一早二叠世煤系沉积成矿,大型-中型硬质高岭土矿床为主	河南焦作市王窑高岭土矿 区,河北邯郸市车辆口—姬 庄高岭土矿
		III-64 鲁西(含淮北)高 岭土成矿带	分布于山东淄博、安丘、章丘、峰县,安徽淮 北、江苏徐州等地,石炭纪一二叠纪煤系沉积 成矿,以中小型硬质高岭土矿床为主	章丘市埠村杨家巷高岭土 矿,安徽宿州市芦岭煤矿
		III-65 胶东高岭土成矿 带	分布于山东烟台市莱西一带,早白垩世安山质 凝灰岩风化残积成矿,中小型高岭土矿为主	山东莱西县东大寨高岭土 矿
I-3 + I-4	II-7 秦岭— 大别成矿省	III-67 桐柏—大别—苏 鲁高岭土成矿带	分布于山东烟台市文登—青岛市一带,花岗岩 风化残积成矿,中小型高岭土矿为主	山东文登高岭土矿小观矿 区
I-3 + I-4	II-15A 下扬 子成矿亚省	III-69 长江中下游高岭 土成矿带	分布于安徽繁昌—马鞍山、江苏苏州一带,主 要是侏罗—白垩系中、酸性火山岩风化或蚀变 成矿。大、中型软质高岭土矿为主	安徽马鞍山市大王山高岭 土矿,江苏苏州市观山高岭 土矿区
		III-70 江南隆起东段高 岭土成矿带	分布于安徽、江西、湖南一带,第四纪风化残 积成矿,以中小型砂质高岭土矿为主	江西昌江区鹊湖高岭土矿 区,青田县王母地高岭土矿
		III-71 武功山—杭州湾 高岭土成矿带	分布于浙江、江西一带,少部分分布在湖南,第 四纪成矿,以小型砂质高岭土矿为主	浙江临安市新桥乡纤岭高 岭土矿区,宜春市何家坪高 岭土矿区
	II-15B 上扬 子成矿亚省	III-72 江汉—洞庭高岭 土成矿带	分布于湖北宜昌、荆门、荆州一带,二叠纪煤 系沉积成矿,以中小高岭土矿床为主	当阳市庙前高岭土矿区,宜 都市松宜煤矿区尖岩河井 田
		III-74 四川盆地高岭土 成矿带	分布于四川省内,二叠纪沉积成矿和第四纪风 化淋滤成矿,主要为小型软质高岭土矿	汉源县后城乡大坪高岭石 矿,叙永县六拐河高岭土矿
		III-76 康滇隆起高岭土 成矿带	分布于四川会理、冕宁和云南楚雄、玉溪一带, 第四纪风化淋积、残积成矿,主要为中小型高 岭土矿	四川会理县关河高岭土矿, 云南易门大黑山高岭土矿
		III-77 上扬子中东部高 岭土成矿带	分布于滇东、湘鄂西—黔中南一带,二叠纪沉 积成矿和第四纪风化残积成矿为主,以大型、 小型软质高岭土矿为主	湖北恩施市花石板高岭土 矿区,湖北当阳市庙前高岭 土矿区
		III-78 江南隆起西段高 岭土成矿带	分布于湖南怀化—沅江一带,第四纪风化残积 成矿,主要为中小型砂质高岭土矿	怀化市鹤城区活水高岭土 矿区
	II-16 华南成 矿省	III-80 浙闽粤沿海高岭 土成矿带	分布于浙江和福建,少量分布于广东,第四纪 沉积、风化沉积和侏罗纪热液蚀变成矿,主要 为小型砂质和软质高岭土矿	浙江瑞安市寺前高岭土矿, 福建同安县东坑高岭土矿 区
		III-81 浙中—武夷山高 岭土成矿带	分布于浙江中部、福建中部、江西东部一带,第 四纪风化残积和侏罗纪热液蚀变成矿,主要为 中小型高岭土矿	浙江诸暨市枫桥镇大梧高 岭土矿,福建省三明市宁化 县青瑶矿区北矿段高岭土 矿
		III-82 永安—梅州—惠 阳高岭土成矿带	分布于福建永安—广东梅州—惠阳,少量分布 于广东,第四纪成矿,主要为中小型砂质高岭 土矿	福建省三明市宁化县青瑶 矿区北矿段高岭土矿,广东 惠阳市沙尾高岭土矿
		III-83 南岭高岭土成矿 带	分布于江西省,少部分分布于广西省北部和湖 南省东部,第四纪风化残积成矿,中小型砂质 高岭土矿为主	江西宜春市王仔冲高岭土 矿区,吉安县敖城镇竹马桥 高岭土矿
		III-84 粤中(坳陷)成矿 带	分布于广东省,第四纪成矿,为大中型砂质高 岭土矿	广东新兴县民乐高岭土矿
		III-85 粤西—桂东南高 岭土成矿带	分布于广东西部、广西东南部,第四纪风化残 积成矿,主要为大型砂质高岭土矿	茂名市高岭土矿区山阁矿 段
		III-86 湘中—桂中北(坳 陷)高岭土成矿带	分布于广西省北部,第四纪风化残积成矿,主 要为小型砂质高岭土矿	广西平乐县大树脚高岭土 矿区
		III-87 钦州高岭土成矿 带	分布于广西省,第四纪风化残积成矿,主要为 大型砂质高岭土矿	广西钦州市新村高岭土矿 区
		III-88 桂西—黔西南— 滇东南部高岭土成矿 带	分布于南宁市,早新近纪沉积成矿,中型软质 高岭土矿	广西南宁市苏圩—吴圩高 岭土矿区
		III-89 滇东南南部高岭 土成矿带	分布于云南省个旧市,第四纪风化残积成矿, 小型高岭土矿	个旧市长石矿(高岭土)
		III-90 海南高岭土成矿 带	分布于海南省,第四纪成矿,为大中型砂质高 岭土矿	海南文昌市龙楼镇伯候村 高岭土矿区,万宁市礼纪镇 三星村砂质高岭土矿区

注: (1)表中成矿域I-1: 古亚洲成矿域; I-2: 秦祁昆成矿域; I-3: 特提斯成矿域; I-4: 滨太平洋成矿域。(2)成矿区带编号按《中国成矿区带划分方案》划分顺序。

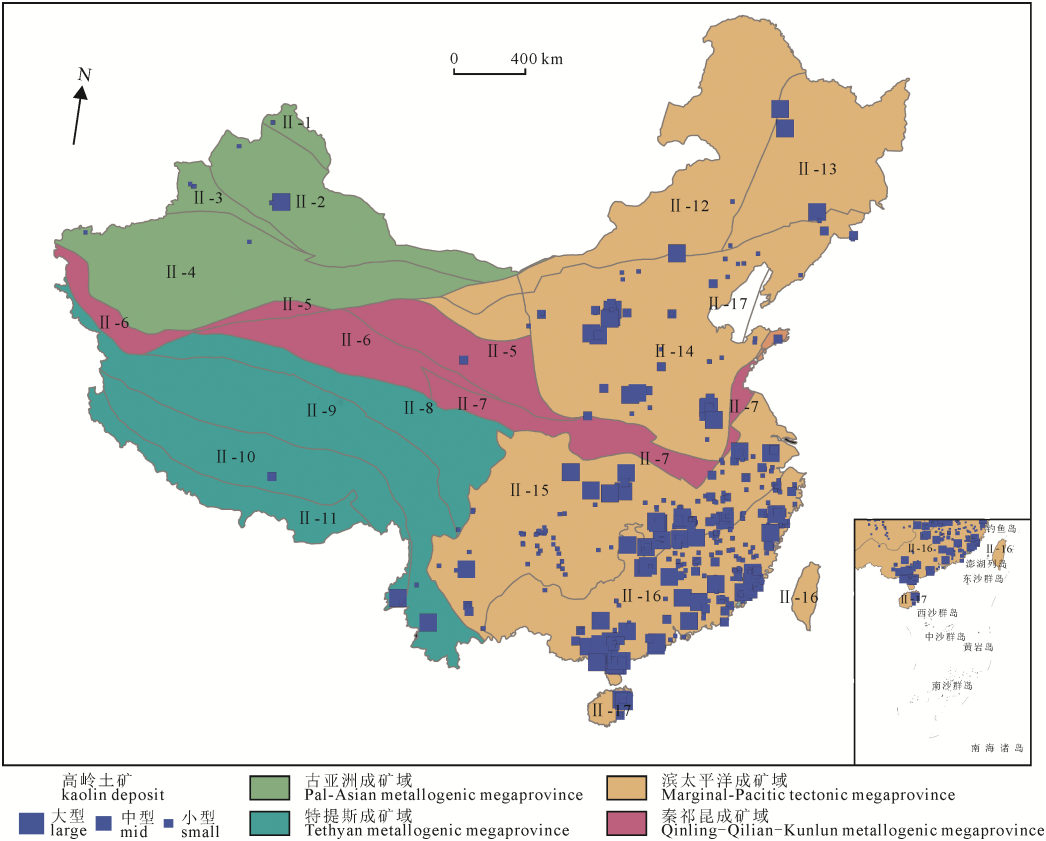


图 1 中国高岭土矿床在 I 级和 II 级成矿区带的分布
Fig. 1 Distribution of I and II grade metallogenic domains of kaolin deposits in China

表 2 中国高岭土矿集区的划分方案
Table 2 Classification scheme of kaolin ore concentration areas in China

序号	矿集区名称	主要成矿时代	矿床成因类型	区内典型矿床
1	内蒙古清水河—准格尔煤系沉积型高岭土矿集区	晚石炭世，早中侏罗世	海陆交互相煤系沉积亚型，陆相煤系沉积亚型	清水河龙泉沟高岭土矿，清水河县桑林坡高岭土矿床，准格尔旗脑包湾沟高岭土矿
2	陕西榆林煤系沉积型高岭土矿集区	晚石炭世	煤系沉积亚型	陕西府谷县海则庙、段寨高岭土矿，陕西府谷县沙川沟高岭土矿
3	江苏苏州热液蚀变型高岭土矿集区	晚侏罗世—白垩纪	中低温热液蚀变-次生改造型	苏州市阳山高岭土矿区，苏州市阳东高岭土矿区，苏州市观山高岭土矿区
4	安徽淮北煤系沉积型高岭土矿集区	石炭纪—二叠纪	煤系沉积亚型为主	安徽淮北市岱河煤矿，淮北市朔里煤矿，宿州市芦岭煤矿
5	江西景德镇风化残积型高岭土矿集区	第四纪	风化残积型为主，少数沉积型	昌江区鹅湖高岭土矿区，浮梁县汤家坞高岭土矿，浮梁县鹅湖矿区高岭土矿
6	湖北恩施沉积型高岭土矿集区	二叠纪	沉积型	恩施市花石板高岭土矿区，恩施市三河村高岭土矿，鹤峰县沙园高岭土矿区
7	湖北通城风化残积型高岭土矿集区	第四纪	风化残积亚型	通城县古木坑高岭土矿区，通城县四庄高岭土矿区，通城县关刀高岭土矿区
8	湖南衡阳界牌风化残积型高岭土矿集区	第四纪	风化残积型为主	衡阳县界牌矿区，衡阳县二斗皂矿区，衡阳县江柏堰矿区
9	湖南醴陵风化残积型高岭土矿集区	第四纪	风化残积型为主	醴陵市马颈坳矿区，醴陵市赵家段矿区，醴陵市斗米冲及烂泥坡矿区
10	福建同安风化残积型高岭土矿集区	第四纪	风化残积型为主	同安县东坑高岭土矿区，同安县郭山高岭土矿布塘矿区，同安县郭山高岭土矿前院矿区
11	广东茂名风化和沉积型高岭土矿集区	晚新近纪	风化残积和沉积型	茂名市上垌高岭土矿区西段，茂名市高岭土矿区山阁矿段，高州市沙田高岭土矿区
12	广东湛江风化残积型高岭土矿集区	第四纪	花岗岩风化残积型	湛江市山岱高岭土矿，湛江市山岱高岭土矿区外围及龙头、岭头矿段，廉江市那榕尾高岭土矿区
13	广西合浦风化残积型高岭土矿集区	第四纪	风化残积亚型	广西合浦县中城矿区，合浦县十字路高岭土矿区，合浦县新屋面—那车垌—周屋—双珠垌矿区高岭土矿区
14	海南东部风化残积型高岭土矿集区	第四纪	风化残余型，滨海沉积型	文昌市龙楼镇伯候村高岭土矿区，万宁市礼纪镇三星村砂质高岭土矿区，万宁市礼纪镇道流村砂质高岭土矿区

往东、从北往南依次编号(表 2)。

2 中国高岭土矿床的时间分布规律

基于对全国范围内有关高岭土矿床成矿年代学资料的系统整理和分析,本文将中国高岭土的成矿时代划分为三个大的成矿期:古生代、中生代、新生代。风化型高岭土矿床主要形成于新生代的第四纪;煤系沉积高岭土矿床主要形成于晚古生代的石炭纪—二叠纪和中生代的三叠纪—侏罗纪;热液蚀变型高岭土矿床主要形成于中生代的侏罗纪。

本次工作统计结果表明,我国高岭土矿床形成时代以中、新生代为主,78%的高岭土矿床形成于中、新生代。按纪细分,高岭土成矿集中分布在 7 个主成矿期,其中最为重要的是第四纪,约占全国高岭土查明资源储量的 48%;其次为石炭纪,约占全国高岭土查明资源储量的 12%。而对于高岭土的含矿层位或风化成因的成矿母岩来说,最早的可以追溯到太古代、元古代的岩体上,但主要成矿母岩的时代还是分布在中生代、新生代。在赋矿空间分布上,60%的高岭土矿床赋存于古生代、中生代、新生代岩系和岩体中(图 2)。

2.1 石炭纪—二叠纪

石炭纪—二叠纪是我国高岭土矿的重要成矿期,占全国高岭土查明资源储量的 20%,矿床类型以煤系沉积高岭土为主,主要分布于皖北、山西、河北、内蒙古等地。此类高岭土往往产于沉积旋回的上部,有明显的沉积韵律。而华南地区煤系沉积高岭土主要形成于二叠纪—三叠纪,部分地区煤系沉积高岭土矿床分布于新近纪沉积的煤系中。

2.2 三叠纪—侏罗纪

中生代中—晚期剧烈火山活动为热液蚀变型矿床的形成提供了良好的条件,此类矿床质地优良,

以江苏阳山高岭土矿为代表。大多数矿床赋存于侏罗系上统的火山岩中,产出空间位置主要受剥蚀面控制。集中分布于苏南与浙江一带,成矿带属于长江中下游与武功山杭州湾,矿床规模多为大中型,占全国高岭土查明资源储量的 14%。

2.3 第四纪

第四纪主要形成风化型高岭土,为我国高岭土的主要成因类型,占全国查明资源储量的 61%,其它成因占 15%,合计占 76%。其在中国南方分布与大面积中生代(燕山期)花岗岩及有关脉岩分布区相吻合。大部分风化型高岭土矿床在中国北方和南方部分地区分布在太古代、元古代、古生代花岗岩、花岗伟晶岩和碱性岩体风化带中。少量风化型高岭土矿床分布在元古代、古生代含长石的硅铝质沉积(变质)岩系中。在成矿区带上来,主要分布于武功山—杭州湾成矿带、浙闽粤沿海成矿带、粤西—桂东南成矿带。

3 中国高岭土矿查明资源储量时空分布特征

据自然资源部 2019 年矿产资源储量通报,我国探明高岭土查明资源储量总共约为 35 亿 t,分布于全国 26 个省(区、直辖市)。按照省份进行统计,江西、福建、广东、广西、江苏、陕西等 6 省拥有 24.8 亿 t 查明资源储量,占全国高岭土查明资源储量的 71%;按照成矿区带来看,粤西—桂东南成矿带拥有最多的高岭土查明资源储量和最丰富的大型矿床,总共拥有 11.9 亿 t,占全国总查明资源储量的 34%,而武功山—杭州湾高岭土矿成矿带矿床数量最多,拥有 111 个矿床,矿床规模以小型为主;按照成因类型来看,风化残积亚型矿床数量和查明资源储量都最多,拥有 304 个矿床和 21.3 亿 t 查明资源

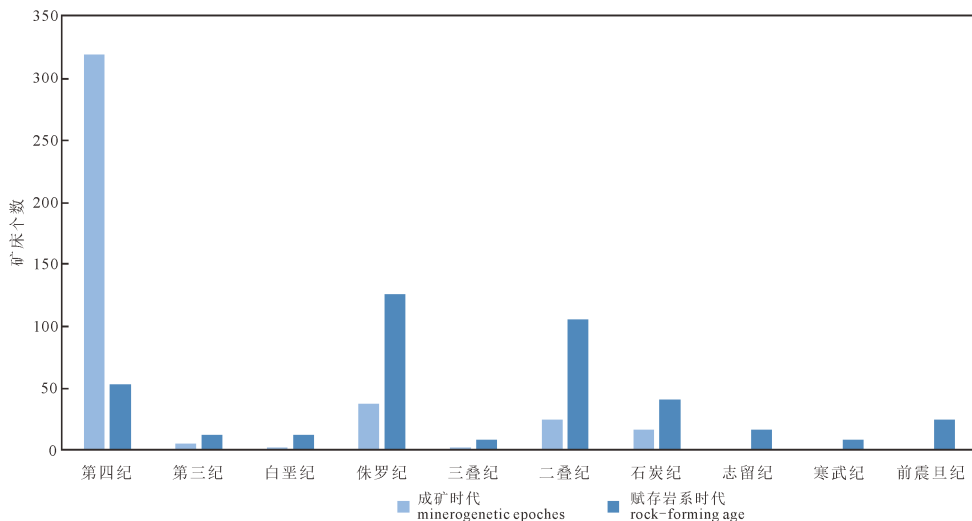


图 2 中国各个成矿期高岭土矿床分布

Fig. 2 Distribution of kaolin deposits in different metallogenic epochs in China

储量, 占全国高岭土查明资源储量的 61%, 其次为煤系沉积亚型, 占全国高岭土查明资源储量的 13%。

本文采用 Arcgis 反距离权重的方法针对全国高岭土的矿床按查明资源储量分布进行空间分析。反距离权重法除了能反映各地的矿床查明资源储量之外, 还能充分考虑各因素之间的地域性联系。反距离加权法是基于“地理第一定律”的基本假设: 即两个物体相似性随他们间的距离增大而减少。它以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均, 离插值点越近的样本赋予的权重越大, 此种方法简单易行, 直观并且效率高, 在已知点分布均匀的情况下插值效果好, 缺点是易受极值的影响(蔡福等, 2005; Lu and Wong, 2007; 刘光孟等, 2010; 吴亚坤等, 2013; 贾悦等, 2016; Mesnard, 2017)。其公式如下:

$$Z = \sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} \quad (1)$$

式中 Z 为估计值; Z_i 为第 $i(i=1, \dots, n)$ 个样本值 d_i 是距离, n 为用于插值的矿床点的数量, p 是距离的幂, 它的选择标准是最小平均绝对误差, 默认 $p=2$ 。

上述高岭土矿床的分布特点虽然主要由地质因素决定, 但也可能有人为的因素, 由于全国的矿产资源分布范围面积较大, 不同地区对不同矿产的开发有所偏倚, 从全国范围上来说, 东部的地质工作做的比西部多, 地质工作程度也深, 发现的矿床就多; 再加上东部交通方便, 矿业发达, 导致矿产分布十分不均匀, 并且掌握的西部资料也较少, 导致西部和东部分布为两个极端。所以不论是直接将所有矿床的查明资源储量进行空间分析或者主观选择代表性的矿床查明资源储量来代表全国范围的高岭土资源的查明资源储量分布都具有明显的局限性。

为了增强选择矿床的代表性, 适当降低人为因素的影响, 本文将大、中型矿床为代表矿点, 以成矿区带为基本单位, 根据反距离权重法计算每个成矿区带的各小型真实矿床对应代表矿床的权重, 再将各个矿床乘以权重后相加求取平均值, 代表这一个矿床点的高岭土查明资源储量值, 如此可以适当降低主观性选择和统计上所带来的误差, 且可视化效果更优。计算公式如下:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_m)^2 + (y_i - y_m)^2} \quad (2)$$

$$\omega_i = \frac{1}{r_i^2} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i^2} \quad (3)$$

式中 x_i, y_i 分别表示所求矿床的经度(°)、纬度(°); y_i, y_m 分别表示所求代表矿床的经度、纬度; r_i 为第 i 个矿床到代表矿床的距离; n 为矿床个数; ω_i 为第 i 个矿床的权重。

例如醴陵市炉佛岭矿区、醴陵市长坡矿区、醴陵市赵家段矿区 3 个矿点, 其经度、纬度分别为炉佛岭(113.2607°E, 27.4809°N)、长坡(113.173°E, 27.4023°N)、赵家段(113.2602°E, 27.5112°N), 代表矿点为醴陵市马颈坳矿区(113.2556°E, 27.422°N)(大型矿床), 按公式(2)、(3), 计算得 3 个矿床的资源量乘以权重后与代表矿床的查明资源储量相加, 得到代表矿床点的虚拟储量值。

按此公式计算的高岭土矿床查明资源储量空间分布模拟结果见图 3。按照此前的研究结论(陶维屏等, 1984, 1994; 周国平和林毓川, 1991a), 中国高岭土矿床整体上主要分布在中国东南部, 但从本次研究和编图成果来看, 中国中部、北部依然有可观查明资源储量的高岭土矿床。实际上, 这也符合基本事实。首先中国北方中、西部有着丰富的煤系高岭土, 如陕西府谷高岭土矿床是我国目前探明的最大高岭土矿床。再往北走, 热液蚀变型高岭土, 和整体高岭土成矿时代的分布规律恰恰相反, 沿环西太平洋自西向东, 自南而北, 成矿地质年代愈来愈新, 比如吉林磐石新立屯超大型高岭土矿探明查明资源储量约 28 亿 t, 成矿时代为三叠纪。另外, 从更大尺度来看, 朝鲜半岛、日本九州岛、本州岛西南部亦有大规模的高岭土矿床, 矿床大部分产于白垩纪及第三系当中, 到本州岛北部则产于中新统火山岩系内, 如板谷矿床(Nagasawa, 1978), 这种时空分布规律也进一步证实了热液蚀变型矿床的时控和层控性质。说明热液蚀变型矿床的形成严格受岛弧火山活动的控制。这一现象完全与环西太平洋火山岛弧随地质年代由西向东, 由南向北逐渐发展的演化历史一致(陶维屏等, 1984, 1994), 因此也证明了这种类型的高岭土矿床分布规律是合理的。

4 中国高岭土矿床时空演化关系

4.1 风化型高岭土矿床

风化残积亚型是我国高岭土矿床最主要的成因类型。同时, 高岭土矿物与岩浆、沉积、风化和变质作用密切相关(Dill and Harald, 2016)。我国风化残积亚型高岭土矿床主要集中在华南成矿省, 杭州湾—武功山、浙闽粤沿海和江南隆起东段高岭土成矿带, 典型矿床有湖南衡阳界牌和福建龙岩东宫下高岭土矿床, 此类矿床成矿时代全部处于第四纪。矿床埋藏浅, 多为露天开采, 可分为两个亚类, 一是原岩就地风化; 二是淋滤再沉积(郑直等, 1983; 郑直和吕达人, 1983)。高岭土是由中酸性火成岩或变质岩在弱酸性地表水持续淋滤作用下形成的产

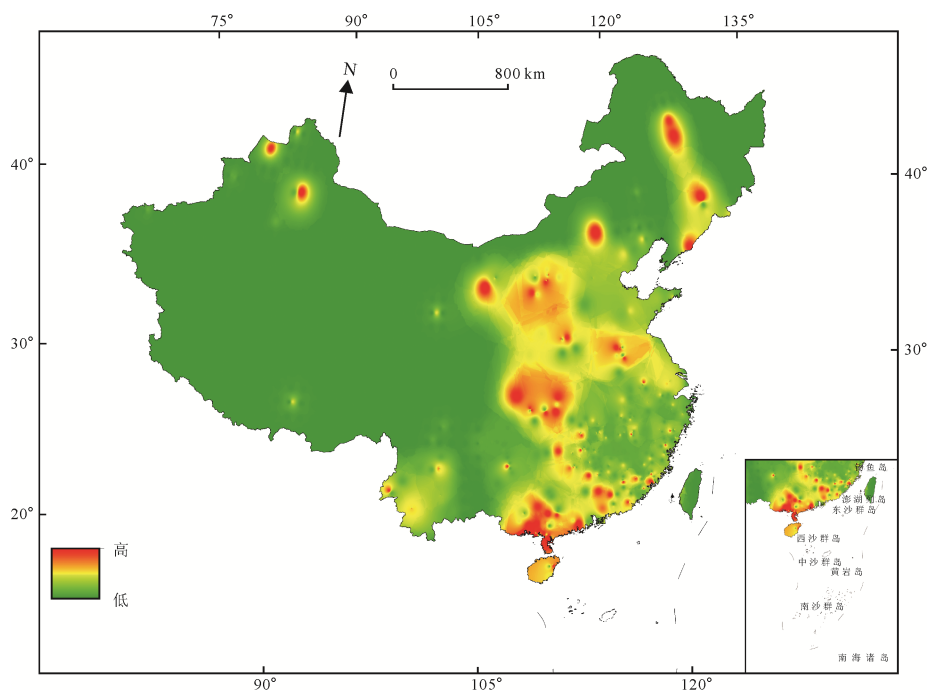


图3 中国高岭土矿床查明资源储量空间分布模拟图
Fig. 3 The simulation map of kaolin reserve distribution in China

物。成矿作用明显地受到风化母岩、构造、围岩、气候、地形地貌、植被和水介质物理化学性质等因素的综合控制(陈开惠, 1984)。成矿原岩为燕山中晚期的中、酸性花岗岩及其脉岩, 其中以黑云母花岗岩和黑云母二长花岗岩为主(周国平和林毓川, 1991b)。

广泛的岩浆活动和强烈的构造变形是中国东部燕山期造山作用的两个主要特征(邓晋福等, 2005)。岩浆的侵入活动在侏罗纪末至白垩纪初达到顶峰, 而喷发活动以晚侏罗纪和新近纪最为强烈, 区内中生代燕山期侵入岩与喷出岩大量分布, 大多为黑云母花岗岩和黑云母二长花岗岩, 火山岩以中酸性火山岩与玄武岩为主。于此, 高岭土的成矿母岩条件已经完备。

从空间分布上来看, 此种矿床的分布大部分与郯庐断裂吻合(陶维屏等, 1984), 郯庐断裂带的伸展活动并非孤立的现象, 它是整个中国东部晚白垩世—早新近纪区域性伸展的一部分, 断裂带两侧同期还伴生了大量的伸展盆地(朱光等, 2001)。在地形上反应为一系列的深大断裂, 并形成开阔形的褶皱。这些褶皱、盆地高岭土的赋存提供了良好的条件。

同时, 这些岩浆岩增加了华南地区岩石圈的刚性, 从而使得华南地区的构造运动较为稳定, 这种稳定的地壳活动, 进一步优化了高岭土风化和保存的环境。进入第四纪以来, 由于中国南方大部分地区属于热带和亚热带气候区, 形成此类矿床需要温暖或湿热的气候条件和起伏微缓的地形条件。前者

提供了充沛的雨量和繁茂的植物, 产生各种有机酸和碳酸等, 促成成矿原岩发生强烈的化学分解。后者提供了广阔的受水面积和舒缓的水力流泄环境(方邳森和胡立勋, 1980; 方邳森和方金满, 1990)。再由于后期构造和岩脉侵入的影响, 原岩发生不均匀的蚀变作用, 主要是钠长石化和白云母化。这些蚀变作用为长石和云母向高岭石转化创造了有利的条件(周国平和林毓川, 1991a; Wilson, 2004)。

4.2 热液蚀变型高岭土矿床

热液蚀变型高岭土是由于火山喷发期后的含硫酸热液对早先形成的火山岩产生蚀变作用而形成的(陈开惠, 1984; 任超鸿, 1987)。热液成因的高岭土受构造条件的控制, 往往分布在断裂带附近(方邳森和方金满, 1990)。在我国有两大分布区, 一块在华东, 一块在东北。已知的此类矿床均产侏罗系火山岩系的中部靠上, 具层控特性, 这种时空分布特点与火山岩系的发育过程有关。一是因为火山喷发旋回的中期靠后, 熔岩减少, 火山碎屑物质增加, 火山岩的结构构造有利于喷气热液的渗透, 而且长石质含量增加, 镁铁含量降低, 利于蚀变成高岭石。二是次火山岩大多侵入在火山岩系中部, 伴随次火山岩的热气蚀变是成矿的必要条件。在热气液温度稍高的地段形成叶腊石矿体, 温度稍低的地段形成高岭石矿体, 这样两种矿体也就常邻近相伴产出, 就是在各自的矿体中, 高岭石与叶腊石两种矿物也常共生产出(陶维屏等, 1984; 陶维屏, 1989)。

4.3 沉积型高岭土矿床

沉积型高岭土矿床在我国主要是煤系沉积型高岭土矿床。我国的煤系高岭土主要形成于石炭—二叠纪, 分布在我国北方中西部地区。在晚石炭纪, 华北陆块可能由于南北两侧挤压作用减缓, 华北陆块再度下陷, 开始接受广泛的海相沉积, 并很快向陆海相交互相、陆相沉积转变。持续到二叠纪为陆相沉积。在此期间, 由下而上演化陆表海—三角洲—河湖相等一系列沉积体系, 以及泻湖沼泽环境为高岭土的沉积提供了理想环境。而其规模和质量似乎与可燃性有机岩的丰度和成煤时代密切相关, 也与煤系中铝硅酸岩沉积的规模和黄铁矿的富集有密切关系。多数文献把它们都划归到沉积型高岭土矿床(陈开惠, 1984; 陶维屏等, 1984)。也有学者发现也可以是煤层风化淋滤形成的, 如四川叙永的高岭土矿床(关铁麟, 1982)。而沉积型又分为两种, 一种是煤层内高岭石夹矸, 一种是煤层间高岭石夹矸。一般来说, 离煤层越近, 高岭土特别是煤层内高岭石夹矸中的高岭石, 成分纯、结晶好、有序度高(陈扬杰, 1988)。薄层状厚度约 10~20 cm, 最厚可达 40 cm 以上, 伴随煤层延展方向展布, 具有一定规模(夏琰, 1985)。

4.4 中国高岭土矿床与大地构造演化关系

总的来看, 在中国大陆的整个历史过程中, 多种高岭土成矿作用随着大地构造的演变而在不同的

地质时期有规律地起着主导作用。可以很明显地看出高岭土成矿时代主要集中于中生代, 地理位置主要集中在中国东南部(图 5)。这是中国高岭土矿床分布的基本规律。而从规律反映出的现象, 却正与中国大地构造的演化历史相吻合(程裕淇等, 1995)。华北陆块区在寒武—奥陶纪是一次碳酸岩台地形成期, 以碳酸盐岩为主夹少量细碎屑岩的浅海陆架沉积广布, 构成了陆块区的盖层。华北陆块区整体抬升上隆成碳酸盐岩剥蚀区, 大规模的碳酸盐岩侵蚀面为矿床的形成提供先决条件。早石炭纪晚期古亚洲洋板块向华北陆块俯冲, 在华北北缘发育了安第斯型活动边缘, 至二叠纪古亚洲洋最终消亡(潘桂棠等, 2009)。晚古生代—早新生代, 已长期夷平的华北陆块接收搬运来的高岭石质黏土, 与成岩作用有关的高岭土矿成矿作用在以沉积为主, 最终在泻湖、三角洲等环境沉积, 形成煤系沉积型高岭土矿床。进入中生代, 中国东部为火山岛弧带, 中生代后期俯冲带东移则处于岛弧内侧, 郯庐断裂带的演化伴随着剧烈的火山活动, 晚侏罗纪燕山期火山岩大量喷发, 新的断裂构造为高岭土矿提供了控矿和容矿场所, 为岩浆后期热液和含矿热液开辟了通道。后期热液在有利条件下沿着构造剥蚀面和断裂裂隙面等贯入, 发生围岩蚀变, 形成了各类与热液蚀变有关的矿床(李灿华和范斯, 1988)。同时大规模的岩浆侵入为后期风化型矿床提供了母岩基础。新

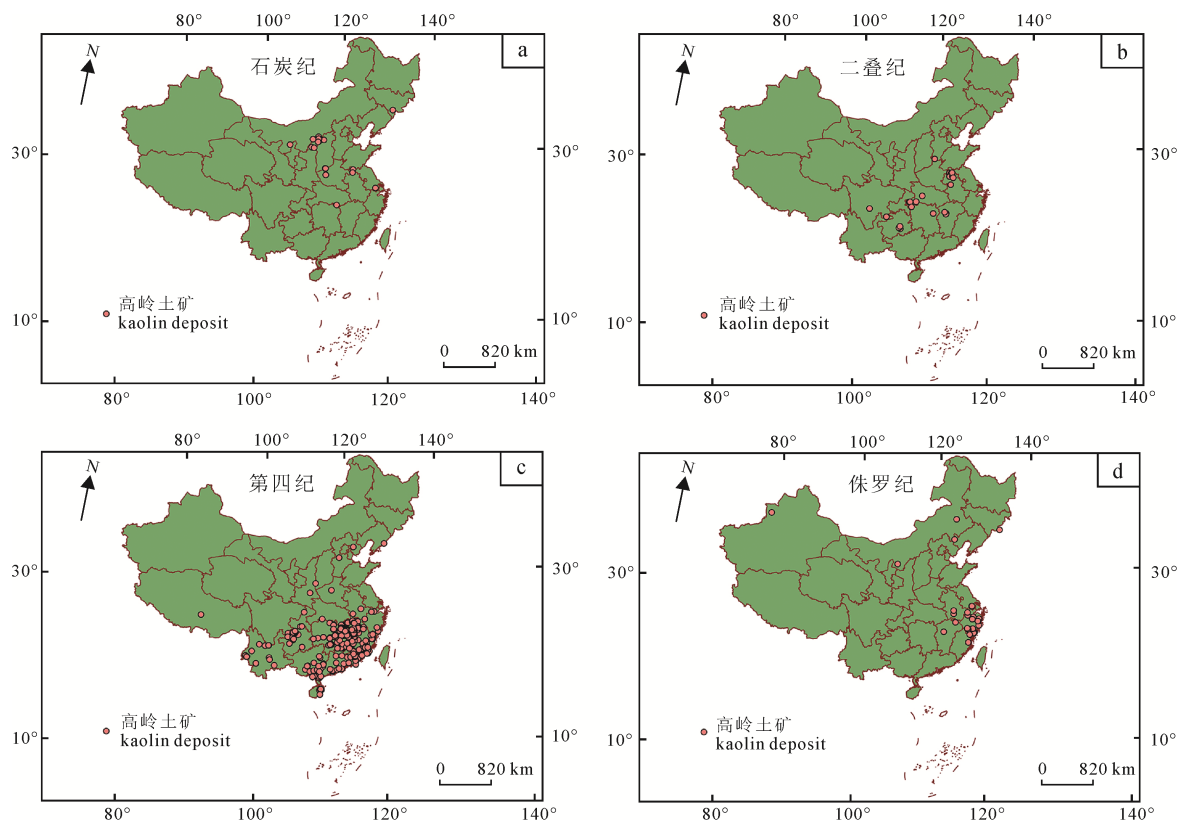


图 4 中国高岭土矿床时空演化规律图

Fig. 4 The map of temporal-spatial evolution of kaolin deposits in China

生代以来,中国东南部地区地处弧后,成矿母岩经过第四纪强烈风化,形成一系列风化型高岭土矿床,同时伴随着沉积作用。由于大规模的板块运动,高岭土矿床可以在不同区域同时发生相同类型的成矿作用,导致了我国高岭土在空间区域上宏大展布。由于成矿作用在时间上的延续性,我国高岭土在相同区域内的不同地质时期发生不同类型的叠加,这种多种成矿的特殊性,导致了我国高岭土在时间尺度上反应为复杂性、多期性和叠加性(陶维屏, 1989, 1994)。

5 结论与建议

本文在前人研究基础上,应用 GIS 等地球信息科学研究方法,对全国高岭土矿床文献和地质勘查成果数据进行挖掘分析,可以得出以下几点结论。

(1)我国高岭土矿床在高岭土矿床时空分布上具有一定的规律性。我国高岭土矿床分布于全国 26 个省(区、直辖市),中国北方以煤系沉积亚型为主,南方则以风化残积亚型为主;矿床规模总体上以中小型为主;成矿时代以新生代为主,其次为中生代;在成矿区带上表现为集中分布于华南成矿省,高岭土矿床总数超过全国 50%以上,并以风化型矿床为主;其次是华北陆块成矿省,涵盖了全国 90%煤系沉积亚型高岭土矿床;而扬子成矿省相对于华北华南成矿省,最具研究和开发价值的应是热液蚀变型高岭土,其热液蚀变型高岭土矿床占全国此类矿床总数量 50%以上。

(2)将我国高岭土成矿区带划分为 4 个成矿域、13 个成矿省、44 个 III 级成矿区带,其中有重点矿集区 14 个。广东茂名、广西合浦、福建同安矿集区宜寻找风化型高岭土,而内蒙古清水河、陕西榆林等北部高岭土矿集区宜重点寻找价值更大的煤系沉积亚型高岭土。同时,需注意的是热液蚀变型高岭土矿床有由南向北逐渐增多的趋势,找矿工作可适当往北部转移。

(3)在我国高岭土资源储量空间分布上,江西、福建、广东、广西、江苏、陕西等 6 省拥有占全国高岭土查明资源储量的 71%;按照成矿区带来看,粤西—桂东南成矿带拥有最多的高岭土查明资源储量和最丰富的大型矿床,总共拥有占全国总查明资源储量的 34%,而武功山—杭州湾高岭土矿成矿带矿床数量最多,但矿床规模以小型为主;按照成因类型来看,风化残积亚型矿床查明资源储量最多,拥有占全国高岭土查明资源储量的 61%;其次为煤系沉积亚型,占全国高岭土查明资源储量的 13%。

(4)中国高岭土矿床时空分布规律与中国大地构造的演化历史相吻合。多种高岭土成矿作用随着

大地构造的演变而在不同的地质时期有规律地起着主导作用。古生代华北陆块区与成岩作用有关的高岭土矿成矿作用在以沉积为主,最终在泻湖、三角洲等环境沉积,形成煤系沉积型高岭土矿床。中生代中国东部为火山岛弧带,燕山期火山岩大量喷发,岩浆期后热液在有利条件下形成热液蚀变型高岭土矿床。新生代中国东南部地区地处弧后,成矿母岩经过第四纪强烈风化,形成一系列风化型高岭土矿床。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. DD20190379).

参考文献:

- 蔡福,于贵瑞,祝青林,何洪林,刘新安,李正泉,郭学兵. 2005. 气象要素空间化方法精度的比较研究——以平均气温为例[J]. 资源科学, 27(05): 173-179.
- 陈建平,张莹,王江霞,肖克炎,姜德波,丁建华,阴江宁,向杰. 2013. 中国铜矿现状及潜力分析[J]. 地质学刊, 37(03): 358-365.
- 陈开惠. 1984. 我国高岭土矿床成因的特征[J]. 中国科学(B 辑), 35(02): 166-174.
- 陈其慎,王高尚. 2007. 我国非能源战略性矿产的界定及其重要性评价[J]. 中国国土资源经济, 4(1): 18-21, 44.
- 陈扬杰. 1988. 煤系地层中高岭土矿床的主要成因类型及特征[J]. 西安矿业学院学报, 9(02): 21-29.
- 陈毓川,朱裕生,肖克炎,张晓华,梅燕雄,闫升好,刘亚玲,宋国耀,李纯杰,王勇毅,董建华,李厚民,丁建华. 2006. 中国成矿区(带)的划分[J]. 矿床地质, 25(S1): 1-6.
- 陈毓川. 1999. 中国主要成矿区带矿产资源远景评价[M]. 北京: 地质出版社.
- 程裕淇,沈永和,张良臣,曹国权,范承钧,陈家义,杨明桂. 1995. 中国大陆的地质构造演化[J]. 中国区域地质, 14(04): 289-294.
- 邓晋福,赵国春,苏尚国,刘翠,陈亦寒,李芳凝,赵兴国. 2005. 燕山造山带燕山期构造叠加及其大地构造背景[J]. 大地构造与成矿学, 29(02): 157-165.
- 方邨森,方金满. 1990. 我国主要类型沉积型高岭土的特征[J]. 非金属矿, 13(01): 5-9, 45.
- 方邨森,胡立勋. 1980. 苏南高岭土[J]. 江苏陶瓷, 18(01): 19-69.
- 高兰,王登红,熊晓云,易承伟. 2014. 中国铝矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 88(12): 2284-2295.
- 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, 1(02): 69-79.
- 侯德封. 1931. “河北省磁县粘土矿地质矿业及窑业”研究报告[R]. 北京: 北平研究院地质学研究所.
- 贾悦,崔宁博,魏新平,匿涩,龚道枝,胡笑涛. 2016. 基于反距离权重法的长江流域参考作物蒸散量算法适用性评价[J]. 农业工程学报, 32(06): 130-138.
- 李灿华,范斯. 1988. 苏州高岭土矿床成因及找矿远景探析[J]. 江苏地质, 12(04): 13-18.
- 李建康,刘喜方,王登红. 2014. 中国锂矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 88(12): 2269-2283.

- 李悦言. 1941. 四川叙永县之含水火泥矿[J]. 地质论评, 6(Z2): 285-290.
- 刘光孟, 汪云甲, 王允. 2010. 反距离权重插值因子对插值误差影响分析[J]. 中国科技论文在线, 5(11): 879-884.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 36(01): 1-16, 255, 17-28.
- 彭琪瑞, 李夷, 顾雄飞. 1963. 中国粘土矿物研究[M]. 北京: 科学出版社.
- 任超鸿. 1987. 苏州高岭土矿控矿因素分析及矿床成因新认识[J]. 矿物岩石, 7(04): 60-68, 126.
- 沈永和. 1957. 论高岭岩——水成岩的一个新种[J]. 地质论评, 17(02): 152-160.
- 唐衡楚. 1957. 数种粘土矿物的比较研究[M]. 北京: 科学出版社.
- 陶维屏, 高锡芬, 孙祁, 章少华, 陈从喜, 罗兴国, 黄光煦. 1994. 中国非金属矿床的成矿系列[M]. 北京: 地质出版社.
- 陶维屏, 孙祁, 杨雅秀, 陈钦强, 廖龙海, 高介武, 蒋绍斌, 傅道济, 陈祖荣. 1984. 中国高岭土矿床地质学[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社.
- 陶维屏. 1966. 华东一高岭土矿床及成因[J]. 地质论评, 24(03): 188-196.
- 陶维屏. 1989. 中国非金属矿床的成矿系列[J]. 地质学报, 68(04): 324-337.
- 汪灵. 2019. 战略性非金属矿产的思考[J]. 矿产保护与利用, 39(6): 1-7.
- 吴亚坤, 刘广明, 杨劲松, 余世鹏. 2013. 基于反距离权重插值的土壤盐分三维分布解析方法[J]. 农业工程学报, 29(03): 100-106, 296.
- 夏琤. 1985. 中国北方石炭-二叠纪高岭石黏土岩的岩石矿物特征[J]. 岩石学报, 1(04): 70-78, 97-98.
- 熊培文. 1991. 广西合浦十字路风化壳型刮刀涂布高岭土矿床地质特征及找矿方向[J]. 广西地质, 4(01): 1-11, 95.
- 徐志刚, 陈毓川, 王登红, 陈郑辉. 2008. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京: 地质出版社.
- 许富安. 2009. 广西合浦十字路高岭土矿资源特点与分析[J]. 非金属矿, 32(S1): 13-14.
- 应立娟, 陈毓川, 王登红, 唐菊兴, 陈郑辉, 王成辉. 2014. 中国铜矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 88(12): 2216-2226.
- 张炳社, 徐永, 王军, 张志海, 高春华. 2013. 陕西府谷高岭土矿沉积环境与成矿关系研究[J]. 西北地质, 46(02): 174-180.
- 章人骏. 1947. 江西乐平县耐火白土概述[J]. 地质论评, 12(Z2): 241-248, 319.
- 郑直, 吕达人, 冯墨林, 冯宝华, 金太权. 1983. 中国高岭土矿床研究[C]//中国地质科学院文集. 北京: 地质出版社.
- 郑直, 吕达人, 金太权, 夏琤, 陈开惠, 姬素荣. 1980. “高岭”名称的来源及中国使用高岭土最早的历史[J]. 地质论评, 44(26): 03272-273.
- 郑直, 吕达人. 1983. 中国主要高岭土矿床[M]. 北京: 科技技术出版社.
- 周国平, 林毓川. 1991a. 沉积-风化型高岭土矿床及其特征[J]. 矿床地质, 10(03): 272-282.
- 周国平, 林毓川. 1991b. 广东沿海地区风化残积型高岭土矿床[J]. 地质学报, 70(01): 58-72, 102.
- 朱光, 王道轩, 刘国生, 宋传中, 徐嘉伟, 牛漫兰. 2001. 郯庐断裂带的伸展活动及其动力学背景[J]. 地质科学, 36(03): 269-278.

References:

- CAI Fu, YU Gui-rui, ZHU Qing-lin, HE Hong-lin, LIU Xin-an, LI Zheng-quan, GUO Xue-bing. 2005. Comparison of Precisions between Spatial Methods of Climatic Factors: A Case Study on Mean Air Temperature[J]. Resources Science, 27(05): 173-179(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jian-ping, ZHANG Ying, WANG Jiang-xia, XIAO Ke-yan, LOU De-bo, DING Jian-hua, YIN Jiang-ning, XIANG Jie. 2013. On present situation and potential analysis of copper resources in China[J]. Journal of Geology, 37(03): 358-365(in Chinese with English abstract).
- CHEN Kai-hui. 1984. Genetic characteristics of Kaolin deposits in China[J]. Scientia Sinica (Series B), 35(02): 166-174(in Chinese).
- CHEN Qi-shen, WANG Gao-shang. 2007. Definition for Strategic Non-energy Minerals in China and Their Quantified Weighty Evaluation[J]. Natural Resource Economics of China, 4(1): 18-21, 44(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yang-jie. 1988. Main genetic types and characteristics of kaolin deposits in coal measures stratum[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 9(02): 21-29(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, ZHU Yu-sheng, XIAO Ke-yan, ZHANG Xiao-hua, MEI Yan-xiong, YAN Sheng-hao, LIU Ya-ling, SONG Guo-yao, LI Chun-jie, WANG Yong-yi, DONG Jian-hua, LI Hou-min, DING Jian-hua. 2006. Division of minerogenic provinces (belts) in China[J]. Mineral Deposits, 25(S1): 1-6(in Chinese).
- CHEN Yu-chuan. 1999. The prospective evaluation of mineral resources in China's major metallogenic belt[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- CHENG Yu-qi, SHEN Yong-he, ZHANG Liang-chen, CAO Guo-quan, FAN Cheng-jun, CHEN Jia-yi, YANG Ming-gui. 1995. Tectonic constitution and evolution of the chinese continent[J]. Regional Geology of China, 14(04): 289-294(in Chinese with English abstract).
- DENG Jin-fu, ZHAO Guo-chun, SU Shang-guo, LIU Cui, CHEN Yi-han, LI Fang-ning, ZHAO Xing-guo. 2005. Structure overlap and tectonic setting of Yanshan orogenic belt in Yanshan era[J]. Geotectonica Et Metallogenia, 29(02): 157-165(in Chinese with English abstract).
- DILL, HARALD G. 2016. Kaolin: Soil, Rock and Ore: From the mineral to the magmatic, sedimentary and metamorphic environments[J]. Earth-Science Reviews, 51(03): 16-161.
- FANG Ye0sen, HU Li-xun. 1980. Kaolin clay in Southern Jiangsu [J]. Jiangsu Ceramics, 18(01): 19-69(in Chinese).
- FANG Ye-sen, FANG Jin-man. 1990. Characteristics of major sedimentary kaolin in China[J]. Nonmetallic Ore, 13(01): 5-9, 45(in Chinese).
- GAO Lan, WANG Deng-hong, XIONG Xiao-yun, YI Cheng-wei. 2014. Summary on Aluminum Ore Deposits Minerogenic Regulation in China[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2284-2295(in Chinese with English abstract).
- GUAN Tie-lin. 1982. A discussion on the geological features and the origin of the kaolinite deposits of Xuyong type[J]. Mineral Deposits, 1(02): 69-79(in Chinese with English abstract).
- HOU De-feng. 1931. Research Report on geology, Mining and Kiln industry of Clay Mine in Cixian county, Hebei Province[R].

- Beijing: Institute of Geology, Peiping Research Institute(in Chinese).
- JIA Yue, CUI Ning-bo, WEI Xin-ping, GONG Dao-zhi, HU Xiao-tao. 2016. Applicability evaluation of different algorithms for reference crop evapotranspiration in Yangtze River Basin based on inverse distance weighted method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 32(06): 130-138(in Chinese with English abstract).
- LI Can-hua, FAN Si. 1988. Origin and exploration of Suzhou kaolin deposit[J]. Jiangsu Geology, 12(04): 13-18(in Chinese with English abstract).
- LI Jian-kang, LIU Xi-fang, WANG Deng-hong. 2014. The Metallogenetic Regularity of Lithium Deposit in China[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2269-2283(in Chinese with English abstract).
- LI Yue-yan. 1941. Shuihuo Ni ore in Xuyong County, Sichuan[J]. Geological Review, 6(Z2): 285-290(in Chinese).
- LIU Guang-meng, WANG Yun-jia, WANG Yun. 2010. Impact of inverse distance weighted interpolation factors on interpolation error[J]. Sciencepaper Online, 5(11): 879-884(in Chinese with English abstract).
- LU G Y, WONG D W. 2007. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique[J]. Computers and Geosciences, 34(9): 1044-1055.
- MESNARD L D. 2017. Pollution models and inverse distance weighting: Some critical remarks[J]. Computers and Geosciences, 43(52): 459-469.
- NAGASAWA K. 1978. Kaolin minerals[J]. Clays and Clay Minerals of Japan, 11(5): 189-219.
- PAN Gui-tang, XIAO Qin-hui, LU Song-nian, DENG Jin-fu, FENG Yi-min, ZHANG Ke-xin, ZHANG Zhi-yong, WANG Fang-guo, XING Guang-fu, HAO Guo-jie, FENG Yan-fang. 2009. Subdivision of tectonic units in China[J]. Geology in China, 36(01): 1-16, 255, 17-28(in Chinese with English abstract).
- PENG Qi-rui, LI Yi, GU Xiong-fei. 1963. Study of Clay minerals in China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- REN Chao-hong. 1987. NEW knowledge of control factors and genesis of Suzhou kaolin deposits[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 7(4): 60-68, 126(in Chinese with English abstract).
- SHEN Yong-he. 1957. On Kaolinite -- a new species of hydrodiagenesis[J]. Geological Review, 17(02): 152-160(in Chinese).
- TANG Heng-chu. 1957. Comparative study of several clay minerals[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- TAO Wei-ping, GAO Xi-fen, SUN Qi, ZHANG Shao-hua, CHEN Cong-xi, LUO Xing-guo, HUANG Guan-gxu. 1994. Metallogenetic series of nonmetallic deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- TAO Wei-ping, SUN Qi, YANG Ya-xiu, CHEN Qin-qiang, LIAO Long-hai, GAO Jie-wu, JIANG Shao-bin, FU Dao-ji, CHEN Zu-rong. 1984. Geology of kaolinite deposits in China[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press(in Chinese).
- TAO Wei-ping. 1966. A Kaolinite deposit in East China and its genesis[J]. Geological Review, 24(03): 188-196(in Chinese).
- TAO Wei-ping. 1989. The minerogenetic series of nonmetallic mineral deposits of China[J]. Acta Geologica Sinica, 68(04): 324-337(in Chinese with English abstract).
- WANG Ling. 2019. Considerations on Strategic Non-metallic Mineral Resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 39(6): 1-7(in Chinese with English abstract).
- WILSON I R. 2004. Kaolin and halloysite deposits of China[J]. Clay Minerals, 39(1): 1-15.
- WU Ya-kun, LIU Guang-ming, YANG Jin-song, YU Shi-peng. 2013. Interpreting method of regional soil salinity 3D distribution based on inverse distance weighting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 29(03): 100-106, 296(in Chinese with English abstract).
- XIA Zheng. 1985. Petrological and mineralogical characteristics of carboniferous-permian kaolinitic claystone in northern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 1(04): 70-78, 97-98(in Chinese with English abstract).
- XIONG Pei-wen. 1991. The geoiogcal characteristics of the weathering-crust type coating kaolin deposit of Shizilu of Hepu of Guangxi and its prospect of exploration[J]. Geology of Guangxi, 4(01): 1-11, 95(in Chinese with English abstract).
- XU Fu-an. 2009. Characteristics and Analysis of kaolin mineral Resources in Cross Road, Hepu, Guangxi[J]. Nonmetallic Ore, 32(S1): 13-14(in Chinese).
- XU Zhi-gang, CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, CHEN Zheng-hui. 2008. The zoning scheme of China's metallogenic belt[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- YING Li-juan, CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, TANG Ju-xing, CHEN Zheng-hui, WANG Cheng-hui. 2014. Metallogenetic Regularity of Copper Ore in China[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2216-2226(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Bing-she, XU Yong, WANG Jun, ZHANG Zhi-hai, GAO Chun-hua. 2013. Study on the Relationship between the Depositional Environment and Mineralization of Fugu Kaolinite Deposit in Shanxi Province[J]. Northwestern Geology, 46(02): 174-180(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Ren-jun. 1947. Overview of fire-resistant clay in Leping County, Jiangxi[J]. Geological Review, 12(Z2): 241-248, 319(in Chinese).
- ZHENG Zhi, LÜ Da-ren, FENG Mo-lin, FENG Bao-hua, JIN Tai-quan. 1983. Study of Kaolin deposits in China[C]//Proceedings of Chinese Academy of Geological Sciences. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHENG Zhi, LÜ Da-ren, JIN Tai-quan, XIA Zheng, CHEN Kai-hui, JI Su-rong. 1980. The origin of the name "Kaolin" and the earliest history of the use of kaolin in China[J]. Geological Review, 44(26): 03272-273(in Chinese).
- ZHENG Zhi, LÜ Da-ren. 1983. Major kaolin deposits in China[M]. Beijing: Science and Technology Press(in Chinese).
- ZHOU Guo-ping, LIN Yu-chuan. 1991a. Sedimentary-weathering type kaolin deposits and their characteristics[J]. Mineral Deposits, 10(03): 272-282(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Guo-ping, LIN Yu-chuan. 1991b. Weathering-residual type kaolin deposits in the coastal area of Guangdong province[J]. Acta Geological Sinica, 70(01): 58-72, 102(in Chinese with English abstract).
- ZHU Guang, WANG Dao-xuan, LIU Guo-sheng, SONG Chuan-zhong, XU Jia-wei, NIU Man-lan. 2001. Extensional activities along the tan-lu fault zone and its geodynamic setting[J]. Scientia Geologica Sinica, 36(03): 269-278(in Chinese with English abstract).