

CNIC-01551
BRIUG-0053

中国高放废物处置库围岩岩石类型的选择
**SELECTION OF THE HOST ROCK
FOR HIGH LEVEL RADIOACTIVE
WASTE REPOSITORY IN CHINA**
(In Chinese)

中国核情报中心
China Nuclear Information Centre

CNIC-01551
BRIUG-0053

中国高放废物处置库围岩岩石类型的选择

金远新 王文广 陈璋如
(核工业北京地质研究院, 100029)

摘 要

介绍了国外高放废物处置库围岩选择的经验及几种处置库围岩的情况, 对在中国分布比较广泛且具有足够规模、厚度、深度的几种围岩进行了调查和研究, 包括花岗岩类、凝灰岩类、泥质岩类、玄武岩类、岩盐和黄土。文中对上述 6 种围岩的分布特征、产出规模、厚度、岩石的矿物组成、化学成分、结构构造、物理力学性质、成因、形成的地质时代及作为处置库围岩的可行性, 进行了比较系统全面的论述。最后经过多方面的综合对比研究, 提出选用花岗岩作为高放废物地质处置库围岩的预选围岩是可行的。

Selection of the Host Rock for High Level Radioactive Waste Repository in China *(In Chinese)*

JIN Yuanxin WANG Wenguang CHEN Zhangru
(Beijing Research Institute of Uranium Geology, CNNC)

ABSTRACT

The authors has briefly introduced the experiences of the host rock selection and the host rock types in other countries for high level radioactive waste repository. The potential host rocks in China are investigated. They include granite, tuff, clay, basalt, salt, and loess. The report has expounded the distributions, scale, thickness, mineral and chemical composition, construction, petrogenesis and the ages of the rock. The possibility of these rocks as the host rock has been studied. The six pieces of distribution map of potential rocks have been made up. Through the synthetical study, it is considered that granite as the host rock of high level radioactive waste repository is possible.

1 国外高放废物处置库围岩选择的研究现状

几十年来，科学家和各国政府都十分关心放射性废物的处置问题，高放废物深地质处置是目前公认的能安全有效处置核废物的方法，核废物地质处置库选址关键因素除社会经济、区域地质构造稳定条件、水文地质条件外，其围岩条件也是一项关系到处置库能否长期安全运行及有效隔离核废物的重要条件。多年来世界各国对此进行了较为详细的研究。其处置库候选围岩有花岗岩、粘土、凝灰岩、页岩、岩盐、玄武岩等。

阿根廷自 1980 年开始进行最终处置高放废物的研究计划。通过研究决定在稳定的地下 500 米深的花岗岩系统中处置核废物，主要原因是花岗岩远离地震带、具有极低的水力传导能力。

比利时在 20 世纪 70 年代中期开始高放废物地质处置的研究工作。在选址过程中考虑的因素有如下二条：（1）围岩自身的地质因素，要求围岩的岩性必须具有低渗透率、低孔隙率，岩性均一，岩石的产状和厚度要求是泥岩厚度至少 100 米，蒸发岩厚度至少 200 米，而硬岩如花岗岩类厚度至少 500 米，并在 200 米以下可开挖，岩层的侧向延伸至少 50 平方公里。（2）场地因素：要有良好的构造和地质稳定性，水文地质条件为地下水具有很低的水流速率。

加拿大认为，处置设施的设计和长期安全性能评价，不仅取决于处置库的围岩，同时还取决于其他特征。因此，在技术上无法确定在众多的地质介质中哪一种围岩是处置核燃料废物最好的围岩。但在加拿大范围内确定哪一种潜在的处置库围岩是最适合或最有可能成功的，这是完全有可能的。然而，在加拿大选择安大略的深成岩是有利的。

芬兰计划将处置库建在结晶岩体中数百米深处，结晶岩主要是指花岗岩类岩石。

法国对多种不同围岩类型进行了研究，它们包括粘土、岩盐、花岗岩和片岩等。法国人认为，以上各种岩性都具有各自的优点，不同的国家在各种岩石类型中的研究已证明在这些岩石类型中建造安全的处置库是可能的。因此法国现在正在粘土、岩盐、花岗岩和片岩等岩石中进行研究，通过研究将选出一个场地建造地下实验室。

德国主要在岩盐中研究，曾经在 Asse 盐矿、Konrad 铁矿山等做过大量工作。现在的工作主要在 Gorleben 盐矿。德国认为岩盐具有良好的机械性能及热传导性；很低的气液渗透能力，不存在大量的地下水；岩盐具有良好的地球化学性能；另外岩盐在德国北部有大量的分布。

荷兰选择了岩盐作为处置库围岩，其主要理由是：在荷兰的北部和东部地区，地下有大量的岩盐存在。

意大利在粘土中进行研究，他们认为，选择粘土作为处置库围岩是因为粘土具有两个主要的特征：一个是它的物理屏障作用，另一个是它的化学屏障作用。

日本受自身地质条件限制，没有岩盐，其他的岩性体规模也比较小，目前的研究工作主要在沉积岩和结晶岩中进行。

瑞典认为围岩是最终安全成功处置高放废物的基础，是处置废物的天然屏障。瑞典根据其国内的地质特征，目前在结晶岩中研究。

瑞士根据其国家的地质条件，选择了花岗岩、粘土和其他沉积岩进行了研究，目前还没有最终确定选择哪一种岩性作为高放废物处置库围岩。

美国早在 1957 年就开始考虑核废物地质处置问题。20 世纪 80 年代对花岗岩、玄武岩、辉长岩、岩盐等多种岩性作为处置库围岩进行了研究。最终选择了 Yucca Mountain 处置场，其围岩为凝灰岩。在其选址过程中，社会因素是关键，当然 Yucca Mountain 处置场的水文地质条件也是最终选定其为高放废物处置场的主要因素。

欧洲共同体委员会（Commission of the European Communities）在进行放射性废物地质隔离体系特性评价（PAGIS）研究中认为粘土、花岗岩、岩盐等处置库围岩，具有各自的优越条件，在一个稳定的地质环境中它们都能安全有效地处置核废物。它总结了成员国中选择这些围岩的依据。

粘土岩 （1）几乎可忽略的地下水运动及低渗透率导致核素的迁移可能只以扩散的形式进行。（2）高的离子交换容量使核素进一步降低其迁移能力。（3）在合适的场地，核素从粘土层到含水层可能需要数百万年。（4）其可塑性会降低开放性断层的发生。

花岗岩 （1）巨大的地质建造，通常具有很低的渗透率。（2）地下水流速很低或其到达生物圈的途径较长。（3）一定规模的断裂或裂隙虽然存在，但在建库深度由于岩石自身压力或充填矿物而闭合。（4）潜在的合适的花岗岩围岩具有长期的地质稳定性。

岩盐 （1）它为核废物提供一个干燥的地质环境，具有很低的孔隙率和渗透率，地下水的运动可以忽略不计。（2）岩盐可以使任何可能引起核素释放的构造裂隙闭合。（3）在合适的岩盐场地核素从围岩中释放出来是不可能的。

选择粘土岩、凝灰岩、玄武岩等具有层状构造作为处置库围岩的国家具有一个共同的特点，就是所选围岩岩石产状比较平缓，厚度比较大，岩石完整性较好，岩石形成时代比较新。

总之，选择某种岩石作为高放废物处置库围岩必须具备许多条件，岩石的矿物组成、化学成分和物理性质应能有效地滞留放射性核素；岩石的水力学性质有利于阻滞地下水对高放废物处置库中的核废物的作用；岩石的力学性质应有利于处置库的施工建设和运行安全；岩石的热学性质应确保围岩的稳定性不因核废物发热而破坏。

2 预选围岩的岩石学特征

当高放废物处置库工程屏障失效后，高放废物处置库围岩将对核废物中的放射性核素的迁移起重要的作用。而影响核素迁移的因素决定于岩石自身的特征及地下水环境特征。就岩石本身而言，岩石的结构构造、矿物组成、化学成分、力学性质，岩石的热物理性质和地球化学特征，均会影响核素的阻滞或迁移。

2.1 预选围岩的结构构造

岩石的结构是指组成岩石的物质结晶程度、颗粒大小、形态及它们之间相互关系的特征。岩石的构造是指组成岩石的各部分（矿物集合体和胶结物）在形成岩石时由于结晶作用或形成后的变化所造成的相互排列、配置与充填方式的特征。它们决定了岩石的物理力学性质，如岩石的孔隙度、渗透率及其他强度特征。

花岗岩类 深成侵入型花岗岩类的矿物结晶顺序，基本上为暗色矿物、斜长石、钾长石，最后为石英。因此深色矿物自形程度最好，其次为斜长石，钾长石较差，而石英总是为他形充填于其他矿物的间隙内。这种半自形等粒状结构在花岗岩中很明显，故称

花岗结构。另外还有似斑状结构、文象结构等。花岗岩类岩石按矿物粒度的大小又可分为粗粒结构 ($d > 5 \text{ mm}$)、中粒结构 ($d = 2 \sim 5 \text{ mm}$) 和细粒结构 ($d < 2 \text{ mm}$)。岩浆花岗岩常呈块状构造,在一定范围内各矿物组分分布均一,特别是在中心相部分尤为如此。在交代型花岗岩内,岩石的结构、构造较为复杂,主要结构类型有:变斑状结构、交代条纹长石结构、蠕英石结构、碎裂结构等。主要的构造类型有残留体构造、片麻状构造、斑杂构造等。

玄武岩 玄武岩是基性熔岩,通常呈细粒隐晶质至玻璃质。常见结构有致密状结构、斑状结构、显微斑状结构和聚斑结构,基质的典型结构是间粒结构、间隐结构和填间结构。间粒结构指的是板条状斜长石微晶之间的棱角状空隙内,充填细小的暗色矿物。间隐结构指的是在斜长石微晶之间充填的是玻璃物质。填间结构即在斜长石棱角状空隙间充填物既有玻璃物质又有辉石等暗色矿物。玄武岩中普遍发育有气孔构造和杏仁状构造。杏仁体是由沸石、玉髓、绿泥石、方解石等充填气孔而成。柱状节理是玄武岩中最常见的原生构造。

凝灰岩 凝灰岩属于一种火山碎屑岩类,它是火山活动产生的各种碎屑(岩屑、晶屑、玻屑及火山尘)通过成岩作用形成的岩石。多数情况下与熔岩和(或)正常沉积岩共生。凝灰岩为凝灰结构,即粒径小于 2 mm 的火山碎屑物占 75%以上。常见的构造有:假流纹构造,由压扁拉长的塑性玻屑和岩屑呈定向排列而成;斑杂构造,由于火山碎屑物在成分上或粒径上分布不均一而表现出来的一种构造;沉凝灰岩还有层理构造等。

泥质岩类 泥质岩类是沉积岩中分布最广的一类岩石,它包括泥岩、页岩、泥板岩等,岩石属于陆源的细屑沉积岩类。主要由粒径 $< 0.0039 \text{ mm}$ 的粘土颗粒组成。泥质岩的结构根据岩石中粘土、粉砂及砂质的含量划分为泥质结构、含粉砂泥质结构、粉砂泥质结构、含砂泥质结构及砂泥质结构等。泥质岩类最常见的构造为层理构造。粘土岩如果沿层理方向有容易剥开的薄层称为页岩。层节理不明显呈块状构造的粘土岩称为泥岩。

粘土岩、凝灰岩经轻微变质脱水,使岩石硬度增大,具有薄板状构造,变余层理构造及变余泥质结构、变余凝灰质结构则称为泥板岩、凝灰质板岩等。

岩盐 岩盐一般为块状及粗粒结晶结构,由于机械作用再沉积可形成碎屑状结构。岩盐层中可有纹层状构造及共生的石膏、硬石膏层,岩盐属蒸发岩,是由于含盐度较高的海水或湖水通过蒸发作用产生的化学沉淀物组成的岩石。

黄土 无层理,经常夹有埋藏土和石灰质结核,柱状节理发育,常呈陡壁几近直立,一般疏松,很容易粉碎,大孔隙很多。孔隙对工程地质和水文地质性质如湿陷性、压缩性、含水量、渗透性等有很大影响。黄土中孔隙主要是原生沉积时形成的孔隙,其次是后生风化成因孔隙,其中包括溶蚀孔隙、生物孔隙根洞、虫孔等。

2.2 预选围岩的矿物组成

花岗岩类岩石 矿物组成主要有:石英、碱性长石、酸性斜长石。石英含量一般在 20%~40%。碱性长石主要有钾长石、条纹长石等。次要矿物有:黑云母、白云母、角闪石、辉石等。副矿物有:锆石、磷灰石、磁铁矿、锐钛矿等。

玄武岩类 主要矿物成分是基性斜长石和辉石。次要矿物最常见的是橄榄石,含有橄榄石的玄武岩称为橄榄玄武岩;在一些碱性玄武岩中有正长石和副长石等。副矿物主要是钛铁氧化物磁铁矿、钛铁矿等。

凝灰岩类 其中绝大部分是在剧烈火山喷发中产生的中-酸性火山凝灰岩，产出最多的是流纹质凝灰岩，其次是安山质、英安质和粗面质凝灰岩，少量玄武质凝灰岩。凝灰岩主要由晶屑、玻屑及岩屑、火山角砾等组成，晶屑的主要矿物是石英、斜长石、正长石，次要矿物是黑云母、角闪石。玻屑则为相应成分的熔岩玻璃。岩屑和火山角砾的岩性比较复杂，可以包含有火山喷出时通过的各种围岩，但以本期喷出的塑性岩屑和前期喷出已固结的熔岩为主。

泥质岩类 该类岩石最重要的矿物成分为粘土矿物，主要有高岭石、多水高岭石、蒙脱石，水云母等。另外粘土质岩石中常含有一些细碎屑矿物如细—粉砂级的石英、长石、云母和少量的重矿物。

岩盐 岩盐主要由石盐 NaCl 组成，但常有含量不等的石膏、硬石膏、芒硝（多为钙芒硝）、钾石盐，以及少量的杂卤石、白钠镁矾、钾盐镁矾、天然碱和粘土杂质等共生。

黄土 黄土的矿物成分由细碎屑矿物和粘土矿物组成，共有 60 余种。碎屑矿物以石英为主，一般占黄土总量的 50%~75%以上，其次是长石、白云母和以方解石为主的碳酸盐矿物，后者常形成较多的碳酸钙结核，少量石膏、玉髓等。重矿物约占 4%~7%，其中有辉石、阳起石、黝帘石、兰晶石、金红石、榍石、锆石、电气石多种铁矿物等 30 余种。粘土矿物以伊利石为主，其次是高岭石、蒙脱石、绿泥石、蛭石等。

2.3 预选围岩的岩石化学特征

围岩的化学成分影响处置库的地球化学环境，从而影响核素的迁移扩散。而岩石的化学成分同该岩石的矿物组成有关，同类岩石具有相似的化学成分。

花岗岩类岩石化学成分上的特点是 SiO_2 含量高，一般均超过 65%，达 70%左右。这类岩石在化学性能上是比较稳定的。

玄武岩中 SiO_2 含量较低，低价铁氧化物含量较高，甚至要比岩石中高价铁氧化物的含量高出几倍。低价铁所处的还原环境有利于阻滞大多数放射性核素溶解和迁移。

凝灰岩虽然与相当的岩浆岩为同样的岩浆形成，因其形成机理不同，其化学成分也有显著不同。一是凝灰岩的化学成分变化大，同属流纹质凝灰岩，其中 SiO_2 含量可由 78.92%到 66.73%；二是与相当的岩浆岩差别较大。

页岩的化学成分也较复杂，其特点是由于页岩等泥质岩类含粘土矿物较多， Al_2O_3 含量高。

岩盐矿床的 NaCl 含量在 50%以上。岩盐中除 NaCl 以外的混杂成分主要是 CaSO_4 ， MgSO_4 ， KCl ， $\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2$ 等化合物分解成的 CaO ， MgO ， Na_2O ， K_2O ， B_2O_3 及 CO_2 ， SO_2 ， Cl 等，其含量或多或少，或有或无，变化不定。

2.4 预选围岩的物理力学性质

岩石的物理性质如孔隙度和渗透率，直接影响岩石的含水性及其它水文地质特征。下面（见表 1）是一些可能作为高放废物处置库围岩的孔隙度和渗透率。

从表中可以看出这几种岩性岩石的孔隙度和渗透率都是比较低的。一般来说，在岩体结构完整断裂、裂隙和节理等不发育的情况下，在这些岩石中地下水是十分贫乏的，并且地下水的流动速率也是很低的。黄土疏松多孔，孔隙度一般为 42%~55%，孔隙比一般为 0.8~1.4。

表 1 几种可作为高放废物处置库围岩的孔隙度和渗透率

	花岗岩		玄武岩		页岩		凝灰岩	
	1	2	1	2	1	2	1	2
孔隙度/%	4.7	1.7	1.44	4.2	1.94	0.96	2.6~3.7	0.35
渗透率/ $\times 10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	26	9.6~260	5	0.1~0.4	1~7.6	2.3	0.51~0.85	

岩石的强度是指岩石抵抗外力破坏的能力。岩体的强度在很大程度上取决于断裂、节理、褶皱和其它构造的发育程度。因而岩体的强度比实际岩石物质的强度低的多。而一般从实验室所获得的数据仅仅是岩石物质强度。

表 2 几种可作为高放废物处置库围岩的力学性质数据

	花岗岩		玄武岩		页岩		凝灰岩		岩盐
	1	2	1	2	1	2	1	2	1
抗压强度/MPa	217	200	250	192.9~399.6	18.7	68.9	170~200	47.1	25
弹性模量/GPa	51.3	63	61.6	55.1~110.2	49~107	10.34	23~46	11.5	35
泊松比	0.23	0.2	0.19	0.22~0.3	0.27	0.1	0.11~0.22	0.11	0.27

从表 2 中可以看出，花岗岩、玄武岩、凝灰岩的岩石强度比较大，而页岩和岩盐的强度相对要低得多。因此从工程的稳定性来看，强度大稳定性相对较好，但是其开发工程难度也较大。岩体的强度要考虑到岩体的断裂、节理、裂隙、褶皱等构造地质条件，工程的稳定性并不仅仅取决于岩石的强度。

2.5 岩石的热物理性质

岩石的热物理性质包括岩石的导热系数、岩石的比热和岩石的线膨胀系数等。这些参数对岩体及地下工程中温度场的形成、温度场的特征、热量的传递、热应力的计算以及热破坏等都是非常重要的。表 3 是部分岩石的热物理性质参数。

岩石的热物理性质与岩石的密度、温度、孔隙度及岩石的温度等有关。同时某些岩石的热物理性质还有各向异性。但从表 3 中可看出，花岗岩的热物理性质较好，其导热系数较大，热量易于迁移，而线膨胀系数不大，因此由热造成的应变量较小。

表 3 部分岩石的热物理参数

岩石类型	导热系数	比热	线膨胀系数
	$\text{W}/\text{m}\cdot\text{C}$	$\text{J}/\text{m}^3\cdot\text{C}$	$\times 10^{-4}/\text{C}$
花岗岩	6.60	0.55~0.79	0.6~0.9
片麻岩	7.47	0.174	
玄武岩	4.62	0.63~0.89	0.54
凝灰岩	5.03		
页岩	1.69		0.9
岩盐	6.1		3.2

3 中国花岗岩类岩石的分布特征

我国花岗岩类岩体分布十分广泛，其产出时代从太古宙、元古宙直到第三纪喜山期各时代、期次的花岗岩类岩体产出齐全。花岗岩为侵入岩浆岩，其出露面积 861 690 km²，占全国陆地面积的 9%。

花岗岩类岩体分布最多的地区是我国东部近海地带，表明花岗岩类岩体大量产出在西太平洋板块与亚洲大陆板块结合部位的活动大陆边缘，由西太平洋板块俯冲（B 型俯冲）引起的。俯冲方向自东南向西北，因而造成我国东部的构造体系及与之密切相关的花岗岩类侵入活动所产生的岩体都呈北北东或北东方向展布。

其次是在欧亚板块与印度板块碰撞部位喜马拉雅碰撞挤压俯冲带（A 型俯冲），印度板块以每年 5 cm 的速度由南向北俯冲挤压，造成西藏南部沿冈底斯山—念青唐古拉山有大量花岗岩体侵入，皆呈东西向长条状分布，印度板块的俯冲不仅影响到板块边缘碰撞带，还极大地影响了我国中西部广大地区的陆内次级板块俯冲带，形成了沿昆仑山、南天山—祁连山和阿尔泰山三条近东西向或北西西向呈线状分布的花岗岩带。

板块俯冲带往往形成断陷或拗陷带成为地槽，地槽回返褶皱成为造山带，并伴随有大量以中酸性为主的岩浆活动。因此大量花岗岩类岩体主要分布在不同构造期的褶皱带（或称造山带）中。从总的分布来看，花岗岩类岩体自加里东期以后其形成时代有自北向南由西向东变新的趋势。各时代岩体的分布概述如下：

太古—元古宙的花岗岩类岩体主要产在太古及元古宙的褶皱带，但自吕梁运动以后都已褶皱隆起变成了古陆，称为台隆、断隆或地轴（地盾）。

3.1 太古宙花岗岩类岩体

主要分布在华北地台东部：辽东台隆的清源—鞍山—金州的广大地区；冀东—辽西台隆的青龙—木头凳至迁西—秦皇岛和绥中—兴城地区；鲁西断隆的济南—潍坊至枣庄—郯城地区；此外在山西台隆的吕梁山和太行山之间也有分布。在岩性上主要是英云闪长质、奥长花岗质、二长花岗质及花岗闪长质片麻岩，以及淡色花岗岩，此外还有大量混合岩化成因的钾质花岗岩。

3.2 元古宙花岗岩类岩体

分布比较广泛，但规模大多数较小，出露分散零星，主要也是分布在古陆块中，其次分布在近东西向的褶皱系中。在由北向南的四条岩浆—构造带中都有产出，但分布断续，数量不多。第一条带是牡丹江—佳木斯—双鸭山北北西向岩浆—构造带，在漠河—塔河地区产出的是花岗岩体，向东至佳木斯、双鸭山地区逐渐变为以花岗闪长岩体为主。

第二条带是天山褶皱带，向东至内蒙地轴、山西断隆及胶辽台隆北段，但其中的岩体规模多数较小，数量也少，零星分布在天山南麓的库尔勒至红柳井地带、呼和浩特以北地区、吕梁山和太行山之间、胶东半岛等地区。主要是花岗岩体，呼和浩特以北地区有一些较大的闪长岩体。

第三条带是昆仑山褶皱带的西段红柳滩地区和东段格尔木附近及阿尔金山地带，向东延至北秦岭褶皱带的西安至南阳一线，以及四川汉中附近。出露的主要是花岗岩体，其次是英云闪长岩、花岗闪长岩和闪长岩体。

第四条带是康滇地轴北段，四川灌县至西昌和江南古陆（台隆）的东部南缘长沙至

南昌一带。在康滇地轴出露的主要是花岗岩和石英闪长岩体，呈南北向分布，与地轴走向一致。后者则主要是规模较大的花岗闪长岩体，近东西向分布。

从各岩浆-构造带所分布的元古宙花岗岩类岩体的数量和规模来看，这一时期的岩浆活动有由北向南逐渐减弱的趋势。

加里东期及其以后的花岗岩类岩体则主要产出在各构造期的褶皱系和褶皱带中。

3.3 加里东期花岗岩类岩体

分布也比较分散和零星，构不成独立的岩浆-构造带。出露最多的是在祁连山褶皱系敦煌至兰州地区和天山褶皱系东端北山地区。岩性有花岗岩、英云闪长岩和石英闪长岩等，岩体数量多，但规模小，分布零星。其次是黑龙江省张广才岭优地槽褶皱带的中北段伊春地区，以花岗闪长岩体为主，其次是花岗岩体；在北秦岭褶皱带天水至信阳一带也有较多分布，以花岗岩和石英闪长岩体为主，少量闪长岩，皆为中小型岩体。此外，在阿尔泰褶皱系富蕴至中俄边界友谊峰地带有两个石英闪长岩和英云闪长岩体出露；在华南褶皱系的湘、赣、粤边界诸广山，桂、粤边界云开大山及赣、闽边界的武夷山都有加里东期英云闪长岩、石英闪长岩和花岗闪长岩、花岗岩体出露，以前二者为主，岩体数量不多，分散分布，但多为中到大型岩体。

3.4 华力西期花岗岩类岩体

主要分布在我国中部和北部地区，数量多，规模大，分布密集，从北到南形成了三条巨大的岩浆-构造带。

第一条带产在疆北阿尔泰褶皱系准噶尔盆地以北地区，主要是花岗岩体，其次是英云闪长岩体，少量花岗闪长岩体。此外在黑龙江省西北部的额尔古纳河至满洲里出露的主要也是华力西期花岗岩体，也属于第一条岩浆-构造带。

第二条带产在天山褶皱系和内蒙大兴安岭褶皱系中，与其相当的地理位置是西起博罗科努山、哈尔克他乌山，向东延长经库米什、北山至内蒙与甘肃西部交界地区的西河、弱水以西地带，以英云闪长岩和闪长岩体为主，向东由阿拉善右旗至白云鄂博、化德、锡林浩特，向北至塔河地区，则变为花岗闪长岩-石英闪长岩-闪长岩组合。

第三条带产在昆仑褶皱系中，沿昆仑山脉到香日德有大量华力西期花岗岩类岩体出露，呈带状分布，其中以花岗岩体为主，其次是花岗闪长岩体，少部分英云闪长岩和闪长岩体。到香日德以东显著减少，至北秦岭褶皱带仅有极少量本期小岩体出露，而被较多的燕山期花岗岩体所代替。

此外，在广西玉林附近还有一些规模较大的华力西期花岗岩体分布。

3.5 印支-燕山期花岗岩类岩体

主要分布在我国东部，尤其是在华南地区出露数量多、规模大、分布密集。在中西部地区主要从昆仑山以南及西河、弱水至青海湖一线以东开始零星出露一些小型燕山期岩体，向南向东逐渐增多，主要分布在以下三条岩浆-构造带和一个岩浆-构造区中。

第一条带产在内蒙大兴安岭褶皱带及其相邻的内蒙地轴，大量花岗岩体分布在西起西河、弱水，向东经白云鄂博、化德、赤峰、承德到阜新地带，向北经锡林浩特、乌兰浩特、塔河到中俄边界。在这条岩浆-构造带中仍以华力西期花岗岩体为主，燕山期花岗岩体居次要地位，分散出露，以小型岩体居多。在乌兰浩特以北有少量印支期花岗岩体分散出露。

第二条带产在柴达木盆地南缘东昆仑山和秦岭褶皱带及相邻的淮阳隆起北缘。东昆仑山仅有少量分散分布的印支期花岗岩、英云闪长岩和花岗闪长岩体，至青海兴海县往东开始出现较多的燕山期花岗岩、花岗闪长岩及石英闪长岩中小型岩体。再往东过天水至秦岭、大别山地带大中型燕山期花岗岩体大量出现，印支期花岗岩及花岗闪长岩居第二位，到西安以东则完全消失。

第三条带产在冈底斯念青唐古拉褶皱系及腾冲、保山褶皱带，即西起西藏噶尔以西中国与克什米尔边界，沿冈底斯山及念青唐古拉山经拉萨向东至横断山转向南，经保山、瑞丽到中缅边境，在这一巨大的岩浆-构造带中以燕山晚期和燕山-喜山期复式花岗岩体为主，其次是花岗闪长岩体。在这一条带的东、西两端都有较多的大型花岗岩及花岗闪长岩体出露，但西端为燕山-喜山期复式岩体，东端为华力西-燕山期复式岩体。横断山以西的岩体受东西向或北西西向深断裂控制，多呈长条状东西向延伸；横断山及其以南的岩体受南北向深断裂控制，呈长条状南北向延长。

一个岩浆构造区即指华南地区，在大地构造上属华南褶皱系，是印支-燕山期花岗岩类分布最为集中、数量最多、规模最大的分布区，其中尤以赣、闽、粤三省分布最多，更为集中，其次是湘、桂（东部）、浙以及皖南。在岩性上花岗岩占绝对优势，其次是花岗闪长岩，少量英云闪长岩及闪长岩。时代以燕山早期为主，其次是印支期，靠近闽、粤沿海地带燕山晚期岩体增多。常形成多期复式岩体。岩体受北北东向构造体系控制，多呈北北东向延长和展布。

3.6 喜马拉雅期花岗岩类岩体

只分布在藏南，主要产在上述之冈底斯念青唐古拉褶皱带，即噶尔至横断山以西地带。岩性主要是花岗岩体，在该带的中段改则-日喀则-拉萨地区有几个中型花岗闪长岩、闪长岩体及复式石英闪长岩体。其次在靠近中印边界的喜马拉雅褶皱带还有一些小型花岗岩体分散出露，这说明藏南是直到第三纪还有岩浆活动现在还在上升的构造活动区，这与印度板块的俯冲是密切相关的。

总起来看，我国花岗岩类岩体分布有很明显的规律性，在我国中西部地区岩体都沿构造活动带呈近东西向或北西西向展布。由北向南有 4 条明显的岩浆-构造带，即新疆阿尔泰岩浆-构造带、天山-阴山-燕山岩浆-构造带、昆仑山-秦岭岩浆-构造带和冈底斯念青唐古拉-横断山岩浆-构造带。岩体侵入时代由北向南逐变年轻，北部阿尔泰地区为华力西期，向南到昆仑山开始有大量小型燕山期岩体出现，到冈底斯山至横断山则以燕山晚期岩体为主，少部分喜山期岩体，到喜马拉雅山地带虽然花岗岩体数量少，规模小，但皆为喜马拉雅期侵入。

我国东部近海地带花岗岩类岩体集中分布在东北和东南地区，东北地区有额尔古纳岩浆-构造带、大兴安岭岩浆-构造带、长白山-山东岩浆-构造带，岩体皆呈北北东向展布。此外还有一条北西向展布的塔河-小兴安岭岩浆-构造带。岩体侵入时代额尔古纳以华力西期为主，向东燕山期岩体逐渐增多，并有元古代、加里东及华力西等多期岩体先期侵入，到长白山及胶辽地区则以燕山期岩体为主。东南即华南地区花岗岩类岩体则大量集中分布在桂、粤、湘、赣、浙、闽 6 省的华南岩浆-构造区，岩体呈北东向展布。侵入时代以燕山期岩体占绝对优势，仅有少量更早期侵入的岩体。

岩性均以花岗岩体为主，其次是花岗闪长岩、英云闪长岩、闪长岩体。从作为高放

废物处置库围岩选择角度来说，要求围岩岩性均一变化小，岩石完整性好，很少受构造破坏及围岩蚀变作用，因此要选择地质构造相对稳定的地区，岩体侵入时代相对较新的花岗岩类岩体为宜。

4 中国玄武岩类岩石的分布特征

我国玄武岩分布也十分广泛，并且经常与花岗岩、凝灰岩分布在同一区域。玄武岩的产出时代自元古代到泥盆纪、石炭纪、二叠纪、三叠纪、侏罗纪、白垩纪直到第三纪、第四纪都有喷出，但各时代玄武岩的分布都有一定的地域性，这是各地区所处的大地构造环境和地质演化历史所决定的。泥盆纪、石炭纪玄武岩主要分布在新疆，二叠纪和三叠纪玄武岩主要分布在川西、滇西、滇东北和黔西地区，中、新生代玄武岩主要分布在内蒙东部和黑龙江省，以及雷州半岛和海南。

4.1 内蒙东部和黑龙江西部玄武岩分布区

本区玄武岩可分为两类：一类是在地质图上标为“ β ”和“ N_1 ”的新生代玄武岩，也称新相岩，其出露面积大，产状与地表地形一致，但厚度多在几十米到一百多米，在喷溢火山口附近厚度较大，但一般厚度 $<300\text{ m}$ 。另一类是古相岩，即产在上侏罗至下白垩统火山岩系中的玄武岩层，其厚度远大于上述新生代玄武岩。

4.2 老爷岭—长白山玄武岩分布区

该区位于黑龙江省南部与吉林省东部省界附近地区，由双鸭山、密山至鸡西、牡丹江、抚松到通化一带。主要是新生代大陆边缘活动带型玄武岩，其连续分布面积和厚度都较上一分布区的新相岩为大。

4.3 雷州半岛及海南玄武岩分布区

从第三纪中新世、上新世至第四纪更新世共有 9 期基性火山喷发，以海相喷发为主，也有陆相及滨海相喷出。但中新一上新世喷出的是橄榄玄武岩，都在砂岩、粘土岩中呈夹层状产出，厚度小，仅几米到几十米，受蛇纹石化。到更新世时喷出的玄武岩厚度加大，上更新统仅上部为伊丁石化橄榄粗玄岩、玄武岩，厚度几十米；中更新统为伊丁石化橄榄玄武岩夹玄武质凝灰岩、角砾岩和古红土层，厚度 200 m ；下更新统主要是蛇纹石化和皂石化橄榄玄武岩和玻基橄榄玄武岩，顶、底部都有火山角砾岩，厚度 650 m 。

4.4 新疆中南部玄武岩分布区

该区玄武岩主要分布在昆仑山中段及吐鲁番—哈密一线以南，北纬 42° 线附近地区，皆为泥盆—石炭纪优地槽沉积中的海相玄武岩层，其次在乌苏—奎屯以南那拉—巩乃斯林场以北地区的上志留统中也有厚度较大的玄武岩层。

4.5 川西—云南—黔西玄武岩分布区

本区横跨川、滇、黔三省，是我国连续分布面积最大玄武岩区。玄武岩主要产在二叠系和上三叠统中，绝大部分为优地槽建造中的海相喷发玄武岩层，因此形成了巨厚的玄武岩层，其堆积厚度居全国之冠。

除上述 5 个连续分布面积较大的玄武岩分布区外，在山东潍坊以南、江苏扬州以西和西藏等地区还有零星分布的新生代玄武岩，但厚度都较小。

5 中国凝灰岩类岩石的分布特征

火山凝灰岩在我国分布也很广泛，大量分布在我国东部地区，主要产在燕山期大陆边缘活动带中酸性火山岩系中，在流纹岩、英安岩、安山岩和一部分玄武岩等火山岩层中相间产出，呈不规则层状，厚度变化较大。其次在我国西部天山地区、柴达木盆地周边地区和藏南冈底斯山、拉萨地区也有分布，但其类型与东部地区完全不同。天山和柴达木盆地周边地区的凝灰岩是产在晚古生代优地槽型沉积中伴随安山岩的喷出形成的，而冈底斯山北坡的凝灰岩则是伴随早喜马拉雅期地槽回返造山阶段喷出的内陆型中酸性火山岩在古新世至始新世期间形成的，在拉萨以北及东西两侧也有上述天山型石炭纪安山质凝灰岩产出。现分区简述如下：

5.1 浙闽凝灰岩分布区

该区在大地构造上为中生代大陆边缘活动带，为华南 6 省（桂、粤、闽、浙、赣）以燕山期为主的花岗岩类分布区的中北段，由西南向东北方向随着花岗岩类侵入体的逐渐减少而凝灰岩却大量增加，从龙田—莆田一线向东北方向凝灰岩的分布面积和厚度逐渐加大，形成主要在闽、浙两省的凝灰岩集中分布区，有许多地段凝灰岩连续沉积厚度 >1000 m。

5.2 内蒙东北部及黑龙江省凝灰岩分布区

本区在大地构造上亦为中生代大陆边缘活动带，被挟持在额尔古纳至东乌珠穆沁—二连浩特与大兴安岭两条以华力西期为主的花岗岩带之间。凝灰岩主要分布在大兴安岭地区，北起塔河，经牙克什、扎兰屯、索伦、多伦到张家口的广大地区，产于上侏罗至下白垩统的中酸性火山岩系中。岩性以流纹质为主，其次是粗安质和安山质的（岩屑）晶屑玻屑凝灰岩，少部分熔凝灰岩。

5.4 藏南凝灰岩分布区

藏南地区凝灰岩主要分布在拉萨地区石炭系中，石炭系厚度 >2000 m，上部是一套灰绿色变质安山岩及安山质凝灰岩夹灰岩透镜体；中下部为石灰岩夹砂页岩及凝灰岩。该区白垩系上部为安山岩夹紫红色页岩、凝灰岩及流纹岩，各层具体厚度不详。

此外在鲁东、台湾及青海柴达木盆地周边地区都有相对面积较小的凝灰岩分布。

6 中国泥质岩类岩石的分布特征

我国泥质岩类岩石的分布十分广泛，从北到南从西到东都有出露，但连续大面积分布的泥质岩主要在我国南部北纬 35° 线以南的广大地区。泥质岩中的页岩基本上都分布在古生代地台型浅海相沉积和中新生代内陆湖相沉积层中，连续沉积的页岩厚度较小，多在 500 m 以下。只有在地槽型沉积层中才有连续沉积厚度较大的泥质岩层，其厚度可达 500 m 以上至二三千米。但伴随地槽回返、褶皱变质及随之而来的岩浆侵入大部分受变质而成为板岩、千枚岩或片岩，然而其中的板岩由于受变质很浅，没有被片理化，岩石仍具有较好的完整性和较强的力学性质，作为处置库围岩的性能并不亚于页岩，而且厚度大，分布面积也广。现将页岩、泥岩和板岩的分布分区叙述如下：

6.1 页岩和泥岩

6.1.1 长江上游及其支流流域页岩（泥岩）分布区

该区是我国最大的一片页岩（泥岩）分布区，包括四川东部、陕西南部、湖北西部、贵州北部、湖南中西部的广大地区。在大地构造上包括四川台拗（成都—巴中—万县—涪陵—宜宾地区）、大巴山台缘褶皱带（陕西至鄂西北狭长地带）和上扬子台褶带（万县—涪陵—宜宾以东、宜昌—常德—黔阳—融水以西地区）。在台褶带原为冒地槽沉积区，页岩厚度较大。

6.1.2 桂粤页岩（泥岩）分布区

该区范围由云南个旧以东，经百色、南宁、梧州至河源以西的广大地区，在大地构造上位于康滇地轴以东，属右江褶皱带和云开褶皱带。前者为三叠纪的冒地槽区，在印支期褶皱回返；后者为早古生代冒地槽区，在晚加里东期褶皱回返，因而地层中常夹有厚度较大的页岩层。

6.1.3 滇西页岩（泥岩）分布区

该区范围北起攀枝花，向南经楚雄、普洱至中国与缅甸、老挝边界。在大地构造上位于康滇地轴以西，属三江（怒江、澜沧江、金沙江）褶皱系的南段。在大理—临沧—景洪一线以东为侏罗—白垩纪陆相拗陷和断陷带，地层中有厚度较大的页岩层。

6.1.4 藏南冈底斯念青唐古拉山页岩（泥岩）分布区

该区为燕山早期至喜马拉雅早期的优地槽和冒地槽区，地层沉积厚度较大，但缺少 1:20 万区测资料。据中国地质图集所附地层表，喜马拉雅山区上侏罗统门卡敦组黑色页岩夹砂质页岩，厚度 >760 m；上三叠统下部曲龙共巴组页岩与砂质页岩互层，夹泥灰岩，厚度 465 m；上石炭统纳兴群灰黑色页岩夹石英砂岩及泥灰岩，厚度 1888 m。

6.1.5 晋冀页岩（泥岩）分布区

包括山西省和冀北地区，在大地构造上山西为华北陆台中的断隆区，冀北是中晚元古代的拗陷带。

山西断隆区的古生界皆属陆台盖层，为稳定型浅海相沉积，一般地层厚度不大，仅在二叠系中含有厚度较大的页岩层。以太原市西郊古交区至交城县以北地区及太原东郊至榆次一带二叠系中的页岩层厚度最大，其中各组皆由紫、兰紫、黄绿、杏黄等色页岩、砂质页岩和泥岩组成，只在中部夹有少许砂岩，厚度 329~502 m。

冀北拗陷带在中晚元古代沉积了总厚度近万米的泥砂质—碳酸盐岩建造，其中有两层厚度较大的页岩层。

6.1.6 赣北皖南浙西页岩分布区

该区在大地构造上属江南台隆的东段，广泛分布着古生代陆台盖层，皆为浅海相沉积，厚度一般不大。但在其中的志留系、奥陶系中含多层连续沉积厚度 >200 m 的页岩层。

此外，在新疆奎屯—乌鲁木齐地区、黑龙江呼玛地区及内蒙索伦—乌兰浩特地区，以及台湾都有相对面积较小的页岩分布。

6.2 板岩

6.2.1 青海东南川西北板岩分布区

该区包括青海阿尼玛卿山、巴颜喀拉山和唐古拉山至川西北若尔盖到盐源、中甸一线以西的广大地区，是我国最大的板岩分布区。在大地构造上属于三江褶皱系及松潘甘

孜褶皱系的东段。该区地层主要是晚第三纪冒地槽相泥质—碎屑岩建造，印支期褶皱隆起遭受浅变质作用，产生大面积分布的上三叠统板岩层，其中以石渠—班玛—松潘一带及甘孜—新龙—理塘地区连续沉积的板岩层数多，厚度大。

6.2.3 黔东南和湖南板岩分布区

本区西起黔东凯里、湘西新晃一线，东至湘赣边界，北至常德—长沙一线，南到桂北罗城、湘南道县、桂东一带。在大地构造上属江南台隆（俗称江南古陆）的西段，主要地层是晚元古代震旦系和板溪群，其中都夹有厚度较大的板岩层。因湖南西部、北部和中部中、新生代的内陆拗陷和断陷作用，使板岩层的分布仅在黔东南保存有连续分布面积较大的板岩区，其余大部分地区板岩分布比较分散，但其中连续沉积的板岩厚度仍然较大。

6.2.4 皖南赣北板岩分布区

本区范围包括鄱阳湖以东，鹰潭、德兴以北至皖南黟县、黄山地区。在大地构造上属江南台隆的东段，与江南台隆的西段和中段之间被中、新生代断陷区、拗陷区（形成长江下游及鄱阳湖水网区）所分割。该区地层主要是中元古代上溪群或双桥群，北部边缘彭泽至黟县一带有小面积的晚元古代板溪群，都是巨厚的冒地槽相泥质—碎屑岩建造，并伴有多层凝灰岩层，都已在距今 8 亿年以前褶皱变质，形成多层连续厚度较大的板岩层。

6.2.5 祁连山板岩分布区

本区位于甘肃省西部祁连山地区，由肃北县至民乐县一带及玉门至张掖一线以南地区。在大地构造上为早古生代（优、冒）地槽区，在加里东晚期褶皱变质，在下古生界中形成了多层厚度较大的板岩层。

6.2.6 陕南板岩（页岩）分布区

本区包括陕南留坝、洋县、镇巴、安康、白河至鄂西北竹溪县一带。在大地构造上横跨南秦岭褶皱带东端和北大巴山褶皱带，为古生代地槽区，分别在印支期及晚加里东期褶皱隆起。在下志留统和中泥盆统中都夹有厚度较大的泥质岩层，但本区地质构造复杂，不同变质程度的泥质岩石并存。

6.2.7 内蒙东北部及黑龙江省板岩分布区

本区位于黑龙江省黑河—五大连池及乌兰浩特一线以西及黑龙江省南部与吉林省界附近的广大地区。在大地构造上为古生代优地槽区，沉积了较厚的古生代火山—沉积建造，到晚加里东期和末华力西期褶皱变质，形成广泛分布的板岩层。但由于中生代地壳活化强烈，被大面积侏罗—白垩纪火山岩系所覆盖，致使古生界在该区呈孤岛状分散分布。

7 中国盐矿的特征

我国盐矿床有两大类型：主要是产于地质时期的岩盐矿床；其次是第四纪形成的湖盐矿床。我国盐矿分布广泛，储量十分丰富。湖盐矿床主要分布在我国西北青海、新疆和西藏三省、区。其次在甘肃、宁夏、内蒙西部也有少量中、小型盐湖分布。但是湖盐矿床埋藏很浅，直接出露地表或在盐湖水体之下，即使在大型和特大型盐湖矿床中，其

盐矿层厚度也普遍很薄，单层盐矿层厚度多在几十厘米到几米，最厚不过 30 多米，而分布面积较大。因此皆不附合作为高放废物深地质处置库围岩的条件。

岩盐矿床是我国主要盐矿资源，分布更为广泛。岩盐矿床主要分布在我国南方各省，NaCl 储量最多的依次为四川（主要集中在该省中东部成都盆地）、湖北（主要集中在荆江—武汉地区江汉盆地）、云南（主要分布在滇中南地区）、江西（樟树和会昌地区），其次是湖南（衡阳地区）、河南（豫北濮阳地区）、山东（鲁北东营—垦利地区）等 7 省，全国特大型和大型岩盐矿床分别为 12 个和 10 个，共有 22 个，分布在上述 7 省 19 个，其余 3 个大型矿床分布在江苏、安徽、新疆各一个。此外在新疆和青海西部还有一些中、小型岩盐矿床分布。在西藏、甘肃、陕西、河北、山西、浙江等省、区则只有少量岩盐矿点分布。总之，全国共有 19 个省、自治区有岩盐分布。

我国岩盐矿床在成因上有海相蒸发沉积和陆相蒸发沉积，还有少数矿床产于海陆交互过渡相蒸发沉积，但几乎全部都产于拗陷盆地中的次级凹陷中。岩盐的成矿时代十分长远，从晚元古代震旦纪到晚第三纪都有产出

岩盐矿体的形状绝大多数呈层状、似层状，少部分呈透镜状。矿体层数多少不一，相差悬殊。海相盐矿层数较少，一般一至数层，最多 24 层（川中盐矿）；陆相盐矿层数较多，一般十至数十层，最多 500~600 层（湖北云应盐矿）。石盐矿体单层厚度一般几十厘米到几米，但江西周田盐矿和四川长宁盐矿单层矿体最厚达 183 m，云南文卡盐矿单层矿体最厚达 477.89 m，均属个别。

石盐矿体的埋藏深度与矿床规模有关，而矿床规模又与凹陷规模和下陷幅度正相关，因此特大型和大型岩盐矿床的埋深较大，由距地表几十米到 5000 m，但大多数矿床石盐矿体埋深都在 300~2000 m。

8 中国黄土的特征

8.1 分布和厚度

黄土是在第四纪时形成的陆相黄色松散土状沉积物，没有层理和砂砾石夹层，垂直节理发育。中国黄土主要分布在东经 75° 至 127° 之间，北纬 33° 至 47° 之间，比欧洲黄土分布的纬度更为偏南，即主要分布在中国北方，西起新疆、青海，经甘肃、陕西、山西、河北、山东，直至东北三省，在南方江苏、四川也有少量黄土堆积。据刘东生所测得的黄土分布总面积为 380 840 km²，占全国总面积的 3.93%；黄土状岩石分布总面积为 254 444 km²，占全国总面积的 2.65%；二者之和为 635 284 km²。王永焱测得的中国黄土及黄土状岩石总面积为 631 000 km²，占全国领土面积的 6.6%。

中国黄土的分布受走向近东—西的山系控制，沿东—西向呈长条状分布，向南以秦岭、伏牛山、大别山为界。

中国黄土的分布还与气候有关，主要分布在最低月温小于 0 °C，年平均降雨量 250~500 mm，年蒸发量在 1000 mm 以上的北方干旱及半干旱地区。

中国黄土分布的高程变化很大，一般在海拔 200~2400 m 之间，个别地区如昆仑山上黄土堆积的高程可达 3500~4020 m。海拔超过 2000 m 的黄土主要分布在黄河中游的甘肃省六盘山以西，六盘山以东的黄土主要分布在海拔 1000~1800 m 之间。海拔 1000 m

以下的黄土主要分布在我国东部地区的一些盆地和西部地区的一些山麓地带。由此可以看出中国黄土的分布还具有坡向性的特点：一般位于山的西坡和北坡的黄土标高高于南坡和东坡黄土的标高。例如甘肃省六盘山北段的北坡黄土分布的高程为海拔 2070 m，而翻过该山的南坡则黄土分布的高程降至 1500 m 左右；山西省吕梁山的北部荷叶坪一带黄土在山的西坡分布高程为海拔 2000 m，至山之东坡则黄土分布降至 1800 m，黄土厚度也较西坡为薄。在许多其它黄土分布的地区都有类似现象。黄土所形成的侵蚀冲沟往往也有坡向性，即北坡缓而南坡陡。而黄土状岩石则分布在较低的位置，常分布在洪积扇的前缘或堆积成广阔的洪积平原。而且在短距离内分布高程的变化远没有黄土那么大。因此这种黄土分布的特点说明其形成主要是与来自北部蒙古和西部的两股季风密切相关。

在黄土分布地带以北有较大面积的沙漠，在沙漠以北又有较大面积的以碎石、砾石为主要成分的戈壁，形成了由南向北由黄土、沙漠和戈壁滩连续排列的形式，这也说明与来自北方的强劲季风的吹扬和风的重力分选作用有关。

然而，黄土状岩石在各地区的具体分布位置与黄土有所不同，例如在甘肃河西走廊地区到乌鞘岭（天祝县南）以西黄土即逐渐减少，但黄土状岩石则很发育，多是洪积扇的前缘沉积。在黄河中游地区黄土大面积分布，充填和覆盖了各式各样的古地形，黄土分布的位置可达标高 2000 m 以上；而黄土状岩石则仅见于低处沟谷之中，多为高处风积原生黄土的次生沉积物。在华北地区黄土多分布于山前低丘及河谷高阶地上，如燕山南麓、太行山东麓；而黄土状岩石则常见于有黄土分布的山地前缘低凹之处。在东北地区黄土仅见于松辽平原的西南部；与其以北的沙漠相接；而黄土状岩石则分布于松辽平原与其东部山地相接的地区。

中国黄土堆积厚度最大的地区在黄河中游（甘肃、陕西），该区黄土连续分布面积最大，厚度也最厚，形成了著名的黄土高原，其面积达 275 600 km²，约占中国黄土总面积的 43.7%，黄土高原西部的兰州至靖远一带黄土堆积最厚，达 300~500 m。靖远县城南偏西曹岷的黄土层剖面厚度达 505 m，是中国和世界上最厚的黄土堆积区。在六盘山以西华家岭至马寒山一线以北到兰州附近，以及陕西延安西北的白于山以西，黄土厚度在 200~300 m 之间；六盘山以东到吕梁山西侧黄土厚度在 100~200 m 之间。青海西宁至甘肃陇西、天水一带及吕梁山、太行山与伏牛山之间的黄土厚度在 50~100 m。天山、昆仑山、阿尔金山及祁连山等山系北麓的黄土厚度均在 50 m 以下。华北平原的黄土多与其它冲积层间互沉积，厚度不大。东北和华南地区分布的黄土厚度较小，黄土性质也不十分典型，多以黄土状岩石为主。

中国黄土的成因主要是由于来自北方和西北方向的风力吹扬作用堆积而成。

8.2 黄土的一些特殊物理性质

可塑性 黄土的可塑性用液性界限、塑性界限和塑性指数来表示，它们的平均值分别列于表 4~6。

压缩性 我国主要黄土分布区不同时代的黄土试样压缩系数的平均值列于表 7。

湿陷性质

黄土由于岩性松软，疏松多孔，固结程度低，遇水浸泡后极易发生塌陷，这就是黄土的湿陷性质，用湿陷系数来表示。黄土的可塑性、压缩性和湿陷性往往使黄土中的建筑工程受到极大破坏，因而是评价黄土工程地质性质的重要指标。由于这些原因黄土不

利于作为高放废物处置库围岩。

表 4 不同地区黄土的液性界限

时 代	地 区					
	VII	I	II	III	IV	V
	北部边缘地区	陇西地区	陇中及陕北地区	关中地区	山西地区	河南地区
Q ₃	26.32	27.6	29.6	30.9	26.6	28.0
Q ₂ ²	25.67	26.87	29.99	31.19	27.3	
Q ₂ ¹	27.9	26.4	29.65	29.65		
Q ₁			31.05			

表 5 不同地区黄土的塑性界限

时 代	地 区					
	VII	I	II	III	IV	V
	北部边缘地区	陇西地区	陇中及陕北地区	关中地区	山西地区	河南地区
Q ₃	16.57	18.23	18.4	18.27	16.45	17.6
Q ₂ ²	17.3	19.53	18.22	18.9	16.9	
Q ₂ ¹	18.1	17.5	17.7	17.85		
Q ₁			19.4			

表 6 不同地区黄土的塑性指数

时 代	地 区					
	VII	I	II	III	IV	V
	北部边缘地区	陇西地区	陇中及陕北地区	关中地区	山西地区	河南地区
Q ₃	9.75	9.37	11.2	12.63	10.15	10.4
Q ₂ ²	8.37	7.37	11.72	12.29	10.4	
Q ₂ ¹	9.8	8.9	11.95	11.8		
Q ₁			11.65			

表 7 不同时代黄土的压缩系数平均值

×10⁻² kPa⁻¹

时代	含水量 状态	压缩试验的压力段划分/ kPa							统计样数
		100~200	200~300	300~400	400~600	600~800	800~1000	1000~1200	
Q ₃	天然	0.0123	0.0146	0.0165	0.0193	0.0181	0.0148	0.0132	23~15
	饱和	0.0813	0.0671	0.0457	0.0334	0.0210	0.0167	0.0126	
Q ₂ ²	天然	0.0086	0.0062	0.0059	0.0063	0.0076	0.0090	0.0091	31~27
	饱和	0.0153	0.0225	0.0244	0.0241	0.0202	0.0177	0.0148	
Q ₂ ¹	天然	0.0074	0.0051	0.0044	0.0040	0.0039	0.0036	0.0036	8
	饱和	0.0098	0.0085	0.0081	0.0096	0.0101	0.0105	0.0109	
Q ₁	天然	0.0075	0.0045	0.0040	0.0035	0.0035	0.0040	0.0060	2
	饱和	0.0075	0.0065	0.0045	0.0040	0.0040	0.0045	0.0065	

9 我国高放废物处置库预选围岩的选择

9.1 选择依据

处置库围岩的选择，取决因素很多，一般地说有以下几个方面：

(1) 首先要在区域构造稳定地区选择岩石类型，因为场地的区域构造不稳定，就不能满足选址的最基本要求；

(2) 地质体的工程地质稳定性是涉及到地下工程是否易于施工，涉及到工程造价的极为重要的问题，不然的话，要保持处置库工程的长期稳定性需要采取不少工程措施来弥补；

(3) 地质体要有足够深度和容量；

(4) 岩石的力学、水力学和对核素的吸附特性要满足建库的要求；

(5) 要考虑社会经济条件，要选在人口稀少地区，目前和将来都是经济不发达的地区，要有较好的交通条件、气候条件，同时尽量考虑离废物产生地不要太远；

(6) 要考虑本国岩石分布特点，如比利时的主要岩石类型是粘土岩，德国含盐地层分布很广，因此，他们按自己的国情选择粘土岩、岩盐和花岗岩等作为相应的处置库围岩；

(7) 有时是先确定场地预选区之后才选择处置库围岩，如美国原来选择多种处置库围岩：凝灰岩、玄武岩和岩盐等，但最后预选区定在 Yucca Mountain，因那里是凝灰岩，所以现凝灰岩选为处置库围岩。

根据一些国家核废物管理计划，许多国家进行了与高放废物地质处置库相关的研究工作，选择了不同的围岩进行了研究。到目前为止，除美国已选定 Nevada 凝灰岩和 WIPP（新墨西哥州）岩盐（处置军用废物）作为高放废物处置库围岩外，其余国家对使用何种围岩最终作为高放废物处置库围岩，还没有做出最终的选择。但各国根据国家的自身条件，选择了适应本国地质条件的围岩进行重点研究，如德国选择了岩盐，比利时选择了粘土岩，瑞典选择了花岗岩等。

针对各国采用不同的围岩进行研究，欧共体选择了多个场地的不同围岩，包括比利时 Mol 和英国 Harwell 的粘土岩、法国 Auriat、Barfleur 和英国的花岗岩、德国 Gorleben、丹麦 Mors、法国和荷兰的岩盐三种围岩进行了地质隔离系统的性能评价。研究表明，在一定地质环境中的粘土岩、花岗岩和岩盐都能安全有效的处置核废物。

在围岩选择研究中，还对其他一些岩性进行过研究，如灰岩、砂岩和硬石膏等。但最终，世界各国将采用粘土岩、花岗岩、岩盐和凝灰岩为主要的候选围岩。

9.2 我国高放废物处置库候选围岩的选择

在我国高放废物地质处置库选址工作的普查阶段，通过对国外资料的调研，结合我国国情，确定了五大片地区作为高放废物处置库预选区，其中包括华东、西北、广东、内蒙古和西南地区。在区域筛选工作阶段，在上述五大片地区进行了区域筛选。先后在浙江、安徽、甘肃、新疆、内蒙古、四川、陕西和广东进行了一系列内容广泛的调研工作，共选出 21 个预选地段。其围岩包括花岗岩、页岩（泥岩）、玄武岩和凝灰岩等。本课题又在东北、福建和四川等地进行了玄武岩、凝灰岩和页岩的野外踏勘，对我国的岩盐、黄土进行了研究。

(1) 花岗岩类

我国花岗岩类分布广泛，花岗岩体出露面积大于 25 km² 的大小岩体约有 400 个左右，

花岗岩类占侵入岩的 86.4%，达 861 690 km²。花岗岩主要分布在华北地台、扬子地台及塔里木地台周边的地槽褶皱带中。集中分布在天山—兴蒙地槽褶皱系、吉黑地槽褶皱系及华南地槽褶皱系地区。

我国北方多以海西期花岗岩类为主，而在南方则以燕山期花岗岩类为主。由于花岗岩多是伴随地槽褶皱回返或回返以后侵入活动的产物，因此花岗岩岩体除构造破碎带外，一般岩石的完整性都很好。另外花岗岩延伸深度大、稳定性好、孔隙率小、含水量少，多为贫水地区。结合区域地质特征、水文地质特征，选择花岗岩类作为处置库围岩是可行的。

在选址过程中，我们对西北地区的旧井岩体、前红泉岩体、饮马场北山岩体和白圆头山-黑山头岩体，华东地区的广德、临安、江山、嵊泗和黟县的花岗岩和花岗闪长岩，西南地区的汉南杂岩体、中坝花岗岩岩体，广东的佛冈岩体和九峰岩体，以及内蒙古大宝力兔岩体进行了研究。从自然地理和社会经济特征、区域地质、地震活动性、预选地段的地质特征等方面研究了这些花岗岩类岩石发育地段作为高放废物地质处置库的可行性，通过研究选择了我国西北地区甘肃预选区作为进一步研究的地区。

(2) 玄武岩

在地质历史上，中国各地质时期几乎都有玄武岩喷出，太古代、元古代有大量玄武岩喷出，但多已变质，可作为处置库围岩的玄武岩有二期：一期为新生代玄武岩分布在吉林、内蒙、黑龙江、广东、海南等省、区，面积约 94 000 km²。另一期为二叠纪玄武岩，分布在云南、四川、贵州等省，面积约 40 000 km²。

二叠纪玄武岩分布于横断山脉和大娄山脉之间，川滇地槽东部靠近扬子地台边缘部位，面积和厚度巨大，岩石气孔构造、孔洞、洞穴不发育，但由于与地层同步褶皱，构造裂隙比较发育。

吉黑玄武岩分布在吉林省长白山区及黑龙江省五大连池地区，其面积广厚度大，气孔构造、孔洞、洞穴发育，原生柱状节理十分发育，地下水丰富水质优良，热泉发育。

雷州—海口玄武岩原生节理、气孔构造、孔洞、洞穴及熔岩管道和隧道发育，熔岩隧道可长达几百米，地下水丰富。

此外，其他地区也有一些不同地质历史时期的玄武岩分布，或由于面积小、厚度薄，或由于时代老及经受后期地质构造运动的影响，无利用价值。综上所述，在川、滇地区的晚二叠世峨眉山组玄武岩的地质、岩性和社会条件尚可考虑作为处置库围岩，但因其地质年代古老，构造发育，常有气孔、孔洞，比较起来仍不如花岗岩更为适宜。

从国际上所进行的研究来看，虽然在高放废物处置库选址的早期，有不少国家把玄武岩作为一主要处置库围岩进行了研究，投入了不少工作。但由于玄武岩自身所具有的上述构造特征，导致目前将玄武岩作为高放废物处置库围岩而进行详细研究的已很少。我国也仅是把玄武岩作为一种选择，进行了有限的研究。

(3) 凝灰岩

我国中-酸性火山活动十分广泛，从时间上看，时代跨度也很大。从分布面积看，中国东部从黑龙江至广东均有大面积的凝灰岩分布，西部从内蒙、新疆到西藏南部等省区也有大面积凝灰岩出露。

在东南沿海的浙江、福建、广东晚侏罗世中、酸性火山岩活动强烈，分布面积很广，

所形成的中、酸性凝灰岩面积达十数万平方公里。黑龙江、内蒙古晚侏罗世出露数千平方公里中、酸性凝灰岩,其厚度亦比较大。而新疆出露的为泥盆纪、石炭纪或更老的火山活动的产物。西藏为白垩纪-第三纪及石炭纪的凝灰岩。从凝灰岩产出的地质条件、厚度、埋深及岩性特征来看,优于玄武岩、泥质岩、岩盐。凝灰岩的物理、力学性质及导热系数均低于花岗岩,其岩石结构远不如花岗岩均匀,且常有砂质岩及熔岩薄夹层。尤其在分布上较年轻的中生代凝灰岩多分布在东部沿海地带人口稠密区,而西部人烟稀少地区的凝灰岩又多为古生代凝灰岩,受后期地质作用岩层褶皱、断裂、裂隙发育。其产出厚度和埋深都不及花岗岩。

目前选定凝灰岩作为高放废物处置库围岩的有美国的内华达 Yucca Mountain 处置场,该场地原为美国核武器试验场,1972 年美国地质调查所将其作为放射性废物地下处置库的候选场地。美国之所以选择 Yucca Mountain 凝灰岩作为处置库围岩,是与它所处的自然地理位置和地质环境分不开的。Yucca Mountain 位于美国西南部大盆地,是美国盆岭自然区内最大的一个子区。大盆地南部为典型的热和半干旱区域性气候。在地质上属于前寒武纪和古生代大陆边缘。晚古生代和中生代的造山运动使该区经历了复杂的变形作用。该区西部主要为新生代火山岩所覆盖。盆地的主要特征是小降雨量、大蒸发量、短暂性溪流、封闭性的水文系统,不存在流出盆地的水流系统。另外,场址干旱,围岩为非饱和状态,区域地下水位深。这样一种自然地理环境和地质条件,是在世界上任何一个地方也找不到的。

(4) 泥质岩类

泥质岩类包括泥岩、页岩及部分浅变质岩类(板岩),在我国分布面积很广,从第 6 章所提供的多处连续厚度较大的泥质岩产状来看,泥质岩中的页岩基本上都分布在古生代地台型浅海相沉积和中新生代内陆湖相沉积层中,连续沉积的页岩厚度较小,多在 500 m 以下。只有在地槽型沉积层中才有连续沉积厚度较大的泥质岩层,其厚度可达 500 m 以上至二、三千米。但伴随地槽回返、褶皱变质及随之而来的岩浆侵入大部分受变质而成为板岩、千枚岩或片岩,然而其中的板岩由于受变质很浅,没有被片理化,岩石仍具有较好的完整性和较强的力学性质,作为处置库围岩的性能并不亚于页岩,而且厚度大,分布面积也广。但页岩、泥岩物理力学性质脆弱易于崩塌,给井巷工程带来困难和隐患;板岩虽然强度较高,但仍远远低于花岗岩的强度,且板理发育、岩石多呈板片状。

较早将泥质岩石作为放射性废物处置库围岩的是比利时。比利时在 20 世纪 70 年代初期就准备把高放废物处置在属于第三系 Rupelian 建造的 Boom 粘土中,特别是在 Mo1 核研究场地下面的 Boom 粘土岩中。为此在 Mo1 地区进行了地下实验研究工作,以证实粘土岩中建造处置库的可行性。目前 Mo1 地下实验室还在进行安全分析、性能评价所需的各种实验研究工作。要选择泥质岩石作为放射性废物处置库围岩,首先岩层平缓是一个先决条件,而在我国发育较广的古生代泥质岩石,经历了长期的构造变动,岩层褶皱,产状变化大,因此其岩层工程地质性质更为复杂。而中新生代内陆湖相沉积层中,其连续沉积的泥质岩厚度不大,其利用的价值不大。

(5) 岩 盐

我国岩盐矿床绝大多数石盐矿体为层状、似层状和透镜状,绝大多数矿层较薄,不符合高放废物深地质处置的要求。更重要的是经常有石膏、硬石膏、芒硝、钾盐、镁盐

及卤水等共生，尤其是经常与石油天然气共生。例如岩盐储量最多的四川盆地已查明中-下三叠统是最主要的储油层，同时也是四川省含盐极丰的地层。这些岩盐矿床不仅有着重要的经济价值，而且多处于人口稠密、水网发育地区，皆已进行深井水溶法开采，成为当地的支柱产业之一，即使有的矿床单层石盐厚度较大（如四川长宁盐矿、云南文卡盐矿），埋藏又深，符合高放废物深地质处置条件，也不能作为高放废物深地质处置的场所。

我国岩盐矿床产出较多，主要分布在四川、云南，其次在湖南、湖北、江西、河北和新疆等省区。其产出时代从晚元古代到新生代，但绝大部分为早-中三叠世和第三纪时形成。岩盐矿床呈层状产出，层多而薄，单层厚度很少超过百米，作为处置库围岩存在很多不利因素。同时岩盐矿床经济价值高，基本上都已成为各产出地区重要的经济支柱产业。岩盐矿体呈盐丘状产出的矿床比较适合高放废物深地质处置之用，但是岩盐矿床一般都是当地政府的重要经济来源。

（6）黄 土

黄土是第四纪形成的陆相黄色松散土状沉积物，没有层理和砂砾石夹层，垂直节理发育。主要分布于中国北方。由于黄土是第四纪最新地层，皆在近地表，厚度一般仅有几十米到 100 多米，埋深极浅，而且黄土区地形垂直切割较深。另外黄土疏松多孔，松散易碎，固结程度低，孔隙率高，孔隙比较大，从工程地质要求来看，黄土的一系列物理力学性能较差。虽然在陇西地区黄土厚度局部可达 300 m 以上，但陇西地区的黄土性能最差。另外黄土疏松的岩性结构特征，导致黄土高渗透率。黄土的地质产状及多方面性能都不适宜于作高放废物处置库的围岩。

10 小 结

花岗岩、凝灰岩、岩盐和粘土岩，是目前世界各国主要的几个作为高放废物处置库围岩的岩石。研究表明在不同的国家，不同的地区由于其自然地理、社会经济条件以及地质条件的限制，作出了符合本国国情的选择。如美国选择了凝灰岩，德国选择了岩盐，芬兰选择了花岗岩类等。

围岩作为防止放射性核素迁移扩散进入生物圈的天然屏障，关系到高放废物处置库能否长期安全运行。在我们进行高放废物处置库全国区域预选的时候就进行了初步的研究，自一九八五年以来，明确提出选址工作要从我国的社会条件、核工业的布局出发，并选择了五大片地区进行工作。考虑了各种不同的围岩类型，在华南主要是花岗岩，华东为花岗岩和凝灰岩，西南为玄武岩和泥质岩，内蒙为花岗岩及泥质岩，西北为花岗岩类。这是根据不同的社会条件、环境，不同的地质背景下形成的不同岩石类型而决定的。而岩盐和黄土，前者是由于其自身的经济价值，后者是由于其工程地质的不稳定性，因此均不宜将它们选为高放废物处置库的围岩。

参 考 文 献

- 1 刘东生, 张宗祜. 中国的黄土, 地质学报, 1962, 42 (1)
- 2 翟礼生. 中国湿陷性黄土区域建筑工程地质概要. 北京: 科学出版社, 1983
- 3 文启忠. 中国黄土地球化学. 北京: 科学出版社, 1989
- 4 Commission of the European Communities. Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste. Nuclear Science and Technology, 1988
- 5 Gandace Y Chan. 放射性废物管理, 国际概况, 国际原子能机构通报, 1992, 34 (3)
- 6 陈璋如. 我国高放废物处置库围岩的选择. 国外铀金地质, 1992 增刊



金远新：核工业北京地质研究院高级工程师，1983年毕业于南京大学地球科学系，1988年在中国地质科学院获硕士学位。从事放射性废物地质处置研究工作。

JIN Yuanxin: Senior engineer of Beijing Research Institute of Uranium Geology, CNNC. Graduated from the Department of Geoscience, Nanjing University in 1983. Received Master degree from Chinese Academy of Geological Science in 1988.