

# 中国东部典型铁镁质尾矿的潜在固碳能力评估

王晓妍<sup>1</sup>, 张丽君<sup>1</sup>, 袁旭音<sup>1\*</sup>, 刘连文<sup>2</sup>, 季峻峰<sup>2</sup>

1. 河海大学 环境学院, 南京 210098; 2. 表生地球化学教育部重点实验室, 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210093

**摘要:** 利用铁镁质尾矿与CO<sub>2</sub>反应, 形成稳定的碳酸盐矿物, 是一种新型的、有前途的固定二氧化碳方法, 而对于这些尾矿固碳潜力的评价则是正确利用尾矿的前提。该文通过我国东部两个典型超基性岩带(东海—日照岩带和赤城—朝阳岩带) 10个矿床尾矿的矿物组分、粒度分布以及相关元素的测定分析, 评估不同矿床尾矿的潜在固碳能力。分析结果显示: 在东海—日照岩带, 尾矿中MgO的含量较高(36.81%~41.39%), 且多以蛇纹石为主, 粗粒物质相对较多; 而在赤城—朝阳岩带, 尾矿中MgO含量中等(5.84%~15.60%), 而CaO含量偏高(5.68%~19.28%), 矿物组分以各种角闪石为主, 尾矿颗粒较细。结合野外调研和计算, 估计赤城—朝阳岩带可以用于封存CO<sub>2</sub>的尾矿潜力为 $4.0 \times 10^8$  t, 远远高于东海—日照岩带。综合化学成分、比表面积、尾矿储量等各方面因素, 赤城—朝阳超基性岩带具有很大CO<sub>2</sub>封存潜力。

**关键词:** 铁镁质尾矿; CO<sub>2</sub>封存; 钙镁含量; 比表面积; 中国东部

中图分类号: X142; P594

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2012)02-0248-08

## Evaluation on Potential Carbon Sequestration Capability of Typical Mafic Tailings in Eastern China

WANG Xiaoyan<sup>1</sup>, ZHANG Lijun<sup>1</sup>, YUAN Xuyin<sup>1\*</sup>, LIU Lianwen<sup>2</sup>, JI Junfeng<sup>2</sup>

1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Surficial Geochemistry, Ministry of Education, Nanjing University,  
School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing 210093, China

**Abstract:** The carbon sequestration by interaction of mafic tailings with CO<sub>2</sub> to form a stable carbonate minerals is a new and promising method for reducing CO<sub>2</sub> emission. The evaluation of CO<sub>2</sub> sequestration potential of mafic tailings is the essential premise for the reasonable utilization of these tailings. This paper mainly aims at 10 tailings in two typical ultrabasic rock belts (Donghai-Rizhao rock belt and Chicheng-Chaoyang rock belt) of eastern China, and analyzes mineral components, size distributions and major elements of tailing samples. Then a comprehensive evaluation about the carbon sequestration potential is taken for these mafic tailings in the two rock belts based on analysis results. In the Donghai-Rizhao rock belt, tailings are dominated by the serpentine, with higher MgO content (36.81%~41.39%) and relative coarser sizes. Compared with minerals in Donghai-Rizhao tailings, a variety of hornblende are the common minerals in the Chicheng-Chaoyang tailings, with moderate MgO content (5.84%~15.60%), higher CaO content (5.68%~19.28%) and finer sizes. By field survey and calculation with the chemical equation, the carbon sequestration capacity of Chicheng-Chaoyang tailings is estimated about  $4.0 \times 10^8$  t, which is much bigger than Donghai-Rizhao tailings. Considering chemical composition, specific surface area, the tailings resources and other factors comprehensively, mafic tailings in Chicheng-Chaoyang rock belt has the large carbon sequestration potential and can be served as one of the most promising storage sites for carbon sequestration.

**Key words:** mafic tailings; CO<sub>2</sub> sequestration; Mg and Ca content; specific surface area; eastern China

**Corresponding author:** Yuan Xuyin, Professor; E-mail: yxy\_hjy@hhu.edu.cn

收稿日期: 2012-03-26; 修回日期: 2012-04-24

基金项目: 国家863项目(2009AA06Z112); 中国地调局工作项目(1212011087126)联合资助

作者简介: 王晓妍, 女, 1988年生, 硕士研究生, 环境地球化学专业; E-mail: freehanfeng@sina.com

\*通信作者: 袁旭音, 男, 1964年生, 教授, 博士生导师; Email: yxy\_hjy@hhu.edu.cn

## 1 前言

工业革命以来,大气中CO<sub>2</sub>含量增加了约30%,体积分数从 $2.80 \times 10^{-8}$ 上升到了最近的 $3.7 \times 10^{-8}$  (Sebastian et al., 2007; 王明星等, 2000; Indermuhle et al., 2000),导致温室效应加剧。因此,我们亟需提高能源转换效率,并利用CO<sub>2</sub>的捕获和封存技术来稳定大气中的CO<sub>2</sub>浓度。现有的CO<sub>2</sub>的封存技术中,矿物封存可以直接将CO<sub>2</sub>转化为稳定的碳酸盐矿物,而且费用相对较低,是一种很有发展前途的技术。镁铁质岩(mafic rock)是指主要由一些以铁镁质(ferromagnesian)暗色矿物组成的超基性-基性杂岩,氧化镁含量相对较高。在这些岩体中常常蕴藏着镍、铜、钴、铂族金属、钒钛磁铁矿、铬铁矿和蛇纹石等矿产,在开发利用这些矿产的同时产生了大量铁镁质尾矿,而在固碳反应中,MgO可以直接与CO<sub>2</sub>发生反应,因此这些含镁高的尾矿是与CO<sub>2</sub>反应的合适原料。

目前,CO<sub>2</sub>矿物封存的研究主要是含镁硅酸盐矿物通过各种物理和化学处理后与CO<sub>2</sub>结合发生碳酸盐化作用(邱克辉等, 2002),或是在常温常压下通过机械活化(Lackner et al., 1995),或用各种化学添加剂(有机酸和无机酸)来加快蛇纹石等镁硅酸盐矿物的溶解(Maroto-valer et al., 2005; 邱克辉等, 2009)。已有的实验证明了橄榄石在粒径75~100 μm, 15~250℃的条件下反应24 h, MgO的转化率可以达到40%~50% (Walters et al., 1999; Goldberg et al., 2001),表明矿物的粒度分布和温度是影响其与CO<sub>2</sub>反应效率的重要因素。比表面积大小在矿物碳酸盐矿物化的过程中起着重要的作用,Vaidyas等(2001)研究发现矿物粒度小于38 μm最有利于碳酸盐化反应的进行。矿物在碾磨和加工过程中比表面积的增加,可以大大的提高尾矿中矿物-水反应速率,即显著提高了尾矿与CO<sub>2</sub>的反应速率(White et al., 1996; Molson et al., 2005)。由于国内对于铁镁质尾矿封存CO<sub>2</sub>的潜力研究还较少,本文选取中国东部两个典型超铁镁质岩带为研究对象,通过对其尾矿的矿物组成、粒度和化学成分特点,结合野外调研,初步估算研究区域铁镁质尾矿固碳作用的规模与潜力,为以后地质利用以及CO<sub>2</sub>封存工作提供背景资料。

## 2 研究区的地质背景

由于受到多期构造运动及变质作用,苏鲁地区如东海蛇绿岩套的原始层序基本被解体,形成变形强度不同的构造岩块。它们分布于扬子古陆板块北缘/苏北—胶南地体(沟弧盆体系)的西北部,大致呈南南西-北北东向带状展布,向南西被郑庐断裂带截切,向北东延入山东日照、荣成等地,这是一条受区域断裂控制的由榴辉岩、超基性岩和基性岩组成的镁铁、超镁铁岩带。超镁铁岩块多属小型规模,一般长宽十余米至数百米,面积0.01~0.5 km<sup>2</sup>。岩块的平面形态呈水滴状、透镜状、扁豆状和长条带状等拉长形态,形成一系列大小不等的岩体及相关矿床(樊金涛, 1996)。在江苏东海和山东日照,有规模较大的蛇纹石矿床,这些矿床在开采利用过程中,形成了大小不等的尾矿。

承德—朝阳断裂系前震旦纪以来长期活动的深大断裂,在区内中部呈40°方向展布,表现为在中生代地层中呈一系列高角度的正、逆断层;东部呈近EW向,表现为前震旦纪地层与中生代地层呈断裂接触,沿接触带往往见有数米至数十米宽的破碎带,形成超基性-基性杂岩体(张力等, 2004)。小张家口超基性岩体是冀北超基性岩带中面积较大的岩体,位于河北省赤城县境内,地处华北地台北缘,内蒙台背斜与燕山沉陷带交界部位,尚义—赤城—隆化深大断裂从区内通过。该岩体在地表的出露形态似一蝌蚪状,东西向延伸,朝南西侧伏;露头范围长10.7 km,宽0.15~1.5 km,据钻探资料,岩体最大延伸超过579 m(陈安国等, 1996)。承德高寺台杂岩体由纯橄岩-橄榄岩-透辉岩-角闪石岩组成,面积达6.1 km<sup>2</sup>,呈东西走向,与围岩片理、片麻理方向一致,其围岩主要是晚太古代单塔子群(谢智等, 2007)。这个岩带形成的矿床主要是大型甚至超大型的钒钛磁铁矿、含铬磁铁矿,开采后形成的尾矿规模巨大,而且交通相对便利,利用的成本相对低廉。

## 3 材料与方法

### 3.1 尾矿样品采集

重点尾矿的样品采自东海—日照岩带和赤城—朝阳岩带(采样点位置见图1),样品均采自

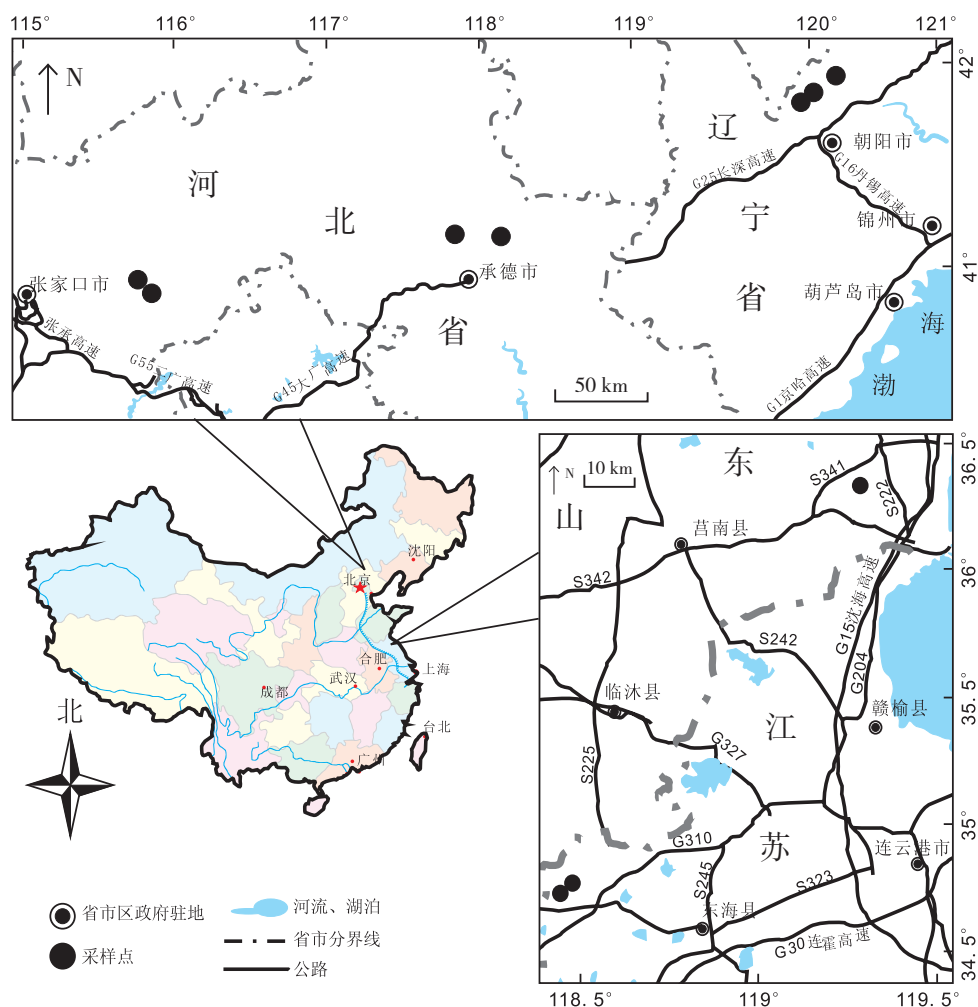


图1 铁镁质矿物尾矿采样点分布图  
Fig. 1 Distributions of sampling sites of mafic tailings

10个典型铁镁质矿床, 每个矿床采尾矿样若干, 每个样品重量约有1.5 kg, 采集的样品放入布袋中存放, 并做好相关记录。在东海—日照岩带有3处尾矿点, 共采集14个尾矿样品; 在赤城—朝阳岩带有7处尾矿点, 共采集34个尾矿样品。

### 3.2 实验分析方法

采集的尾矿样品首先过10目的筛子, 剔除粗颗粒, 使分析测试样品的粒径 $<2$  mm, 尾矿的大致分析方法如下, 数据处理均采用Excel 2007进行统计分析。

尾矿的矿物组成分析: 采用X-射线分析, Cu靶粉末压片法, 电压35 kV, 电流20 mA, 扫描速度( $2\theta$ )  $2^\circ$ /分, 分析仪器为D/max-B型X-射线衍射仪(XRD), 采用Jade5.0软件半定量分析矿物成分。

粒度分析: 分别称取1 g尾矿样品倒入烧杯

中, 加入10 mL的10%的 $H_2O_2$ 与10 mL的10%稀盐酸加热, 清洗后加入适量0.05 N的六偏磷酸钠为分散剂, 然后使用Mastersizer-2000型激光粒度仪分析粒度分析, 相对误差小于2%。

常量元素分析: 在南京大学现代分析中心, 通过美国热电ARL9800XP+型X射线荧光光谱仪(XRF)进行测定, 计量单位为质量百分数。

## 4 分析结果及讨论

### 4.1 尾矿的矿物组分分析

岩石中的橄榄石和蛇纹石是封存 $CO_2$ 的首选矿物, 然而由于长期地质环境作用, 超基性岩会发生蚀变, 即岩石中所含的不稳定铁镁矿物如橄榄石、辉石等会蚀变成蛇纹石、透闪石、绿泥石等, 因此不同尾矿中矿物组成差异较大。根据X-射线衍射的分析结果, 利用Jade5.0软件获得主要

的矿物成分,各主要矿点尾矿的主要矿物成分见图2。

东海—日照岩带超基性岩体尾矿(图2a)主要以蛇纹石 $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (包括纤蛇纹石、叶蛇纹石等)以及斜绿泥石 $(\text{Mg}, \text{Al})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ 为主,通过XRD半定量分析,其中蛇纹石占主要部分,大致含量为19.74%~63.13%。赤

城—朝阳岩带尾矿的矿物组成(图2b)主要以多种角闪石(如富铁钠闪石、镁铁闪石、铁角闪石等)、堇青石 $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$ 为主,部分尾矿含有金云母 $\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ 和辉石 $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$ 。蛇纹石、斜绿泥石、富铁钠闪石、镁锰闪石及堇青石中Mg和Ca的总含量分别为26.09%, 18.1%, 16.31%, 14.89%和8.22%。

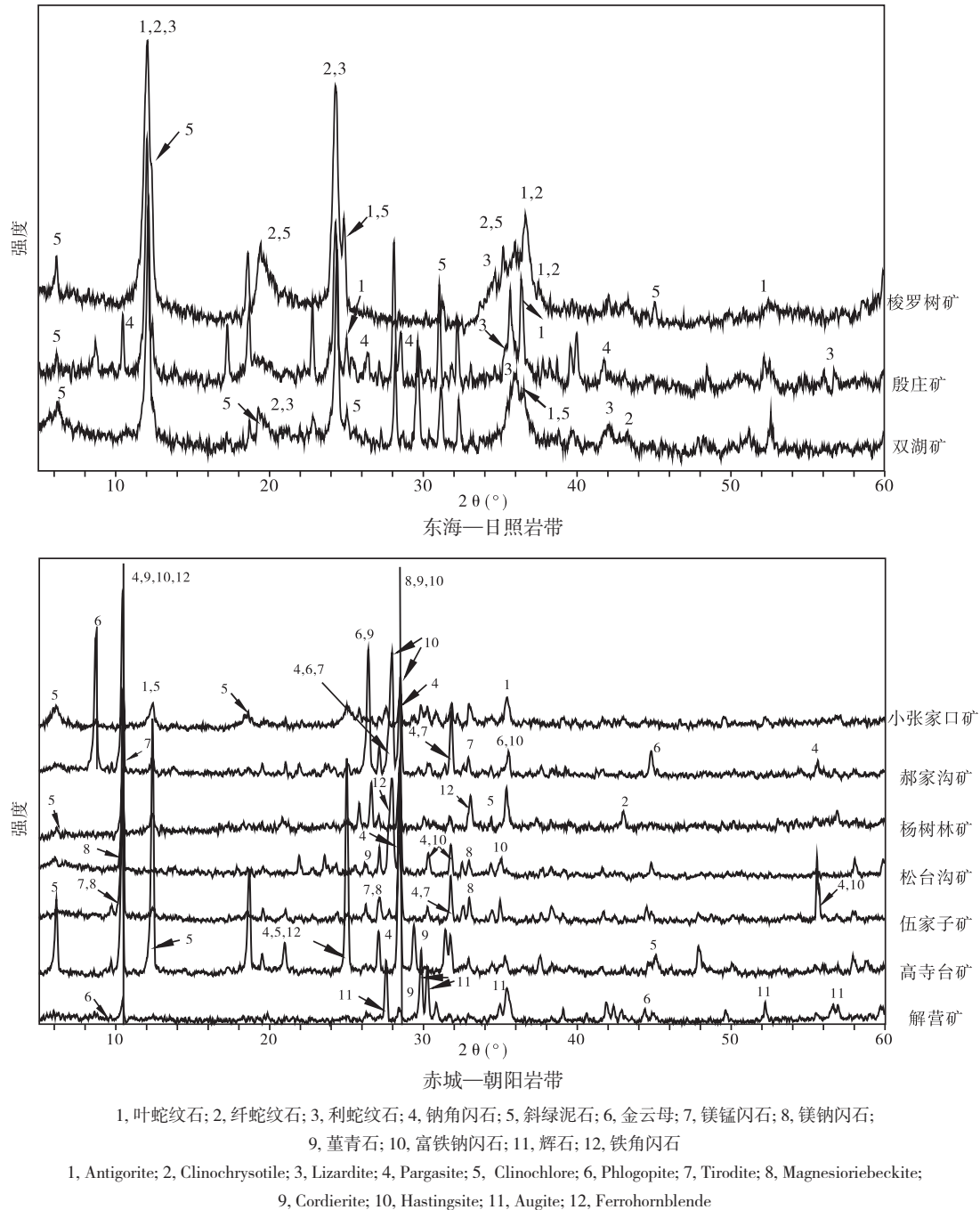


图2 不同矿床尾矿样品的XRD衍射图谱

Fig. 2 XRD spectra of the mine tailing samples in the studied areas



蛇纹石中的Mg没有与Si原子结合形成稳定化学键 ( Larachi et al., 2010 ), 相较于其它矿物更易于释放, 因此以蛇纹石为主要矿物的尾矿是与CO<sub>2</sub>发生反应的最佳原材料。从Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>含量与储量 (表1), 东海—日照岩带尾矿封存CO<sub>2</sub>的可利用性相对较高。

## 4.2 尾矿粒度组成分析

### 4.2.1 粒径分布分维数

样品按粒径分布的分维数 $D$ 表征了分形粒径分布的复杂 (不均匀) 程度的量度, 包括颗粒的粒径大小和数量。 $D=0$ 表明样品中所有颗粒具有相同的粒径大小, 不存在粒径分布;  $D>0$ 表明在一定的粒径范围内存在自相似的粒径分布。

对于RR分布函数, 当 $x/a \ll 1$ 时即对于细颗粒系统是分形的 (李嘉等, 2003)。令分布模数 $m=3-D$ , 则

$$M_T = \int_0^x \rho C_V x^3 dn(x) = \rho C_V C \frac{D}{3-D} x^{3-D} \quad (1)$$

式中 $C_V$ 是体积形状系数;  $\rho$ 是颗粒密度;  $C$ 是比例常数;  $x$ 是粒径。累积体积 $M(<x)$ 为

$$M(<x) = \int_0^x \rho C_V x^3 dn(x) = \rho C_V C \frac{D}{3-D} x^{3-D} \quad (2)$$

则有:

$$W(<x) = \frac{M(<x)}{M_T} \times 100 = 100 \left( \frac{x}{x_{\max}} \right)^{3-D} \quad (3)$$

以 $\ln W(<x)$ 对 $\ln(x/x_{\max})$ 作图, 若为一条直线, 则由直线的斜率可以求得分布分维数 $D$ , 该分形维数表明尾矿粒级分布的均匀性,  $D$ 值越小分布均匀性越好。高台寺矿相关性系数为0.937, 其他矿点的相关性系数都在0.99左右 (表2), 这表示 $\ln W(<x)$ 和 $\ln(x/x_{\max})$ 的线性相关性很好, 尾矿的粒级分布相对均匀。

随着样品颗粒系统中小粒径颗粒的比重增加, 分布分维 $D$ 值增大, 分布分维 $D$ 形象直观和定量准确地反映了样品颗粒系统的粒径分布情况。 $D$ 值越大, 质量比表面积越大, 尾矿与CO<sub>2</sub>的反应越迅速。总体上, 两个岩带矿床尾矿的粒级分布均匀性较好。相对而言, 殷庄矿分维 $D$ 数值最低为2.403, 而高台寺矿最高为2.693, 这样的结果对尾矿与CO<sub>2</sub>的反应速率影响并不大。

### 4.2.2 尾矿比表面积

比表面积是指单位质量物料所具有的总面积, 它是影响尾矿吸附的重要物理参数, 在固定CO<sub>2</sub>反应中, 尾矿的比表面积越大, 与CO<sub>2</sub>和水的接触面积就越大, 反应速率越快。由于颗粒物直径与比表面积有着直接关系, Sverdrup等 (1996)

表1 典型铁镁质尾矿样品化学成分平均分析值 (%) 及储量 ( $\times 10^8$  t)

Table 1 Average contents of chemical composition (%) and estimated mine resources ( $10^8$  t) of typical mafic tailings

成分	东海—日照岩带			赤城—朝阳岩带						
	双湖矿	殷庄矿	梭罗树矿	小张山口矿	郝家沟矿	杨树林矿	松台沟矿	伍家子矿	高台寺矿	解营矿
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.71	0.60	1.13	3.90	7.50	10.18	16.06	13.04	14.03	7.49
CaO	0.18	3.93	0.65	19.28	19.12	9.67	10.16	5.68	7.10	17.84
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.86	6.46	9.57	14.65	16.00	12.33	18.71	15.15	20.73	14.82
K <sub>2</sub> O	0.07	0.02	0.03	0.12	0.54	1.28	1.03	1.79	0.58	0.75
MgO	41.39	36.93	36.81	15.60	13.74	11.99	7.97	5.84	8.57	12.84
MnO	0.08	0.08	0.13	0.12	0.11	0.20	0.17	0.12	0.13	0.16
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.20	0.04	1.71	2.05	2.58	2.30	0.42
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.02	0.02	0.26	5.05	0.53	0.64	0.41	0.87	1.62
SiO <sub>2</sub>	35.89	35.47	37.12	43.71	35.18	48.33	39.57	51.46	39.01	40.30
TiO <sub>2</sub>	0.07	0.07	0.10	0.90	1.64	0.61	2.25	0.80	3.35	1.23
LOI	14.89	16.66	13.98	1.93	2.03	3.55	2.18	3.93	4.35	2.95
SUM	100.16	100.24	100.22	100.68	100.97	100.38	100.79	100.80	101.02	100.43
m/f	10.12	9.63	6.61	1.91	1.45	1.61	0.72	0.65	0.73	1.45
Mg <sup>#</sup>	93.61	93.28	90.29	71.74	67.59	70.25	50.89	48.33	50.83	67.79
储量	0.80	0.54	0.28	4.17	1.50	2.81	7.80	6.23	5.27	3.90

注: m/f=w(Mg)/w(Fe+Mn), Mg<sup>#</sup>=100 w(MgO)/w(MgO+TFEo)

表2 尾矿粒径分布的分形维数和体积累积百分率

Table 2 The fractal dimension and accumulative percentages of tailings in the studied areas

编号	<2 $\mu\text{m}$	<50 $\mu\text{m}$	<100 $\mu\text{m}$	<250 $\mu\text{m}$	<500 $\mu\text{m}$	<1000 $\mu\text{m}$	<2000 $\mu\text{m}$	分维 $D$	相关性系数
双湖矿	0.75	12.19	18.76	34.24	54.82	87.51	100.00	2.489	0.998
殷庄矿	0.02	5.94	9.93	19.16	33.97	64.30	100.00	2.403	0.998
梭罗树矿	0.95	12.70	18.89	32.62	53.07	81.66	100.00	2.497	0.994
小张家口矿	0.48	15.07	22.17	38.80	61.53	86.78	100.00	2.511	0.992
郝家沟矿	0.21	11.35	18.30	37.15	60.70	85.83	100.00	2.475	0.988
杨树林矿	0.16	9.23	15.27	31.44	54.10	82.48	100.00	2.436	0.993
松台沟矿	0.15	11.33	19.42	39.62	63.39	87.91	100.00	2.471	0.984
伍家子矿	1.30	16.21	24.12	39.00	56.56	80.53	100.00	2.595	0.997
高寺台矿	1.98	21.16	24.47	30.39	43.10	74.15	100.00	2.693	0.937
解营矿	0.18	10.26	15.48	29.26	52.55	84.80	100.00	2.441	0.995

提出的表面积公式，可得到各采样点基本比表面积情况。

$$A_w = (0.08X_{\text{clay}} + 0.022X_{\text{silt}} + 0.003X_{\text{fine sand}} + 0.0005X_{\text{coarse sand}}) \quad (4)$$

其中， $A_w$ 为比表面积 ( $\text{m}^2/\text{g}$ )； $X$ 为粘粒、粉粒、细砂粒和粗砂粒的质量百分比，且 $X_{\text{clay}} + X_{\text{silt}} + X_{\text{fine sand}} + X_{\text{coarse sand}} = 100$ ；粘粒为粒径 $<2 \mu\text{m}$ 颗粒，粉粒为粒径 $2\sim 60 \mu\text{m}$ ，细砂粒为粒径 $60\sim 250 \mu\text{m}$ ，粗砂粒为粒径 $>250 \mu\text{m}$ 颗粒。根据尾矿的粒度分析和方程式(4)，获得了不同地区尾矿的平均比表面积数据(图3)。

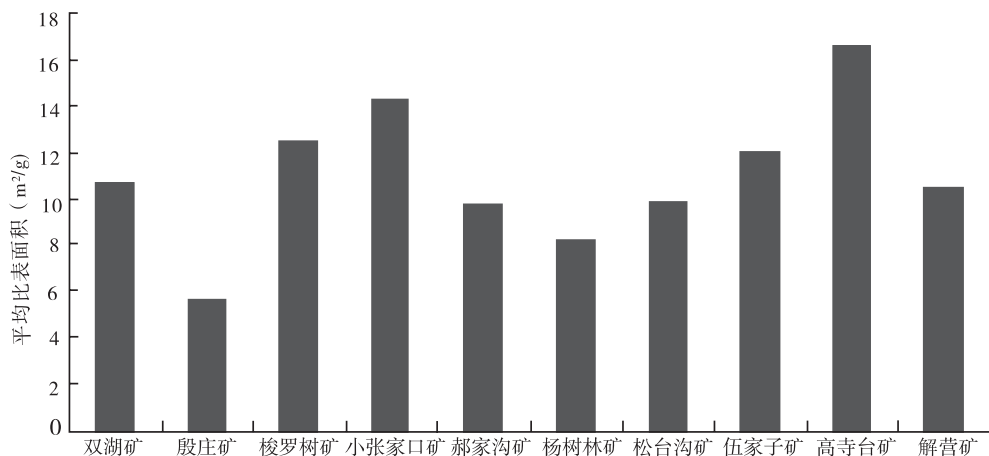
从图3中可以发现，小张家口矿和高寺台矿比表面积较大，殷庄矿最小，而其他地区的比表面积差别不大，均值在 $10.49 \text{ m}^2/\text{g}$ 。由表1可知，分布分维 $D$ 与比表面积之间呈显著性正相关。造成比表面积差异的部分原因是矿石开采过程中的磨和

加工过程，其次也与它们本身的化学特性和自然风化有关。从比表面积方面来说，赤城—朝阳岩带的高寺台矿比表面积最大，为 $16.56 \text{ m}^2/\text{g}$ ，小张家口矿、伍家子矿、解营矿紧随其后，而日照—东海岩带梭罗树矿的尾矿平均比表面积较大，为 $12.51 \text{ m}^2/\text{g}$ 。

通过机械破碎可以增大比表面积，同时也可以通过化学法来实现。其中硫酸被认为是最有效的化学活化剂，能使得矿物表面积由 $8 \text{ m}^2/\text{g}$ 增加到 $330 \text{ m}^2/\text{g}$ ，甚至更高，结果使参与反应的矿物转化率增加了53% (Maroto-Valer et al., 2005)，但是大规模的应用会增加成本。因此为了降低固定 $\text{CO}_2$ 成本，选择适当的化学活化剂是必要的。

#### 4.3 尾矿化学成分分析

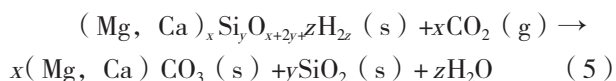
钙镁含量直接关系到封存 $\text{CO}_2$ 的效率，因此对尾矿进行了常量分析、确定其中的钙镁含量对尾

图3 尾矿样品的平均比表面积 ( $\text{m}^2/\text{g}$ )Fig. 3 Mean specific surface area of mine tailings in the studied areas ( $\text{m}^2/\text{g}$ )

矿利用是必要的步骤。

常量元素分析结果列于表1。虽然尾矿 $\text{SiO}_2$ 含量35.18%~51.46%，平均值为40.60%，大多属于超基性岩的成分范围。但从表中可见，两个岩带的尾矿在化学成分上存在较明显差异。东海—日照岩带尾矿的LOI（烧失量）相对较高，可能结构水的含量较高，使得 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 含量相对较低，其 $m/f$ 值为6.61~10.12，平均值为8.79，按吴利仁（1963）分类方案，镁铁比值在6.5以上，此岩带属于典型镁质超基性岩。赤城—朝阳岩带尾矿 $m/f$ 值较低，平均为1.11，应为铁质或富铁质超基性—基性杂岩的尾矿。

铁镁质尾矿中矿物（如蛇纹石、橄榄石等）封存 $\text{CO}_2$ 的机理为如下反应式，其中第一个分子式表示铁镁质矿物的通式（Teir et al., 2007）：



赤城—朝阳岩带尾矿 $\text{CaO}$ 含量为5.68%~19.28%，平均为12.69%，变化范围较大，但与 $\text{MgO}$ 一样可以与 $\text{CO}_2$ 形成碳酸盐。 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 含量变化均较大，可能为后期绿片岩或角闪岩相变质作用使其迁移，使得浓度降低或富集。LOI较低，可能是由于岩石变质过程中挥发性物质流失较多。在两个岩带也有差异性，主要集中在两个不同的区段，90~95和45~75，且基性程度越高的尾矿 $\text{Mg}^\#$ 越大。由反应方程式可知， $m/f$ 和 $\text{Mg}^\#$ 的数值越大，即镁含量在尾矿中所占的比例越大，对 $\text{CO}_2$ 的封存速率和封存量越有利。因此从化学成分方面考虑，东

海—日照岩带尾矿在固碳反应中的可利用效率要高于赤城—朝阳岩带。

#### 4.4 尾矿的总体可利用性分析

在尾矿的固碳反应中，主要是 $\text{Mg}$ 和 $\text{Ca}$ 与 $\text{CO}_2$ 发生反应生成稳定的碳酸盐，根据 $\text{Mg}$ 、 $\text{Ca}$ 含量以及尾矿储量的不同，估算出铁镁质尾矿封存 $\text{CO}_2$ 的潜力。

由于赤城—朝阳岩带尾矿储量大， $\text{MgO}$ 和 $\text{CaO}$ 的总含量明显高于东海—日照岩带（图4）。有研究表明，运用湿系统并仔细控制化学溶液使得反应经过1 h后， $\text{CO}_2$ 转化率达到65%（Goldberg et al., 2001；O'Connor et al., 2001）。因此在计算 $\text{CO}_2$ 的封存总量时按可利用总量的60%计算，赤城—朝阳岩带尾矿可以封存的 $\text{CO}_2$ 量可达 $4.0 \times 10^8 \text{ t}$ 左右，而东海—日照岩带尾矿二氧化碳封存量约为 $0.4 \times 10^8 \text{ t}$ 。在实际应用方面，赤城—朝阳岩带存在大量尾矿，无需开采挖掘，交通便利，为以后的运输提供了良好条件。

综合以上几方面，赤城—朝阳岩带尾矿封存 $\text{CO}_2$ 的潜力巨大，约为东海—日照岩带储量的10倍，是我国铁镁质尾矿封存 $\text{CO}_2$ 的重要地点。

## 5 结论

中国东部的东海—日照、赤城—朝阳超基性岩岩带出产有储量丰富的铁镁质尾矿，这些尾矿能够用来固定 $\text{CO}_2$ 。两个岩带尾矿的地球化学性质存在差异，在化学成分和矿物组成方面，东海—日照岩带尾矿的 $\text{MgO}$ 含量较高，比表面积相对较高，且多

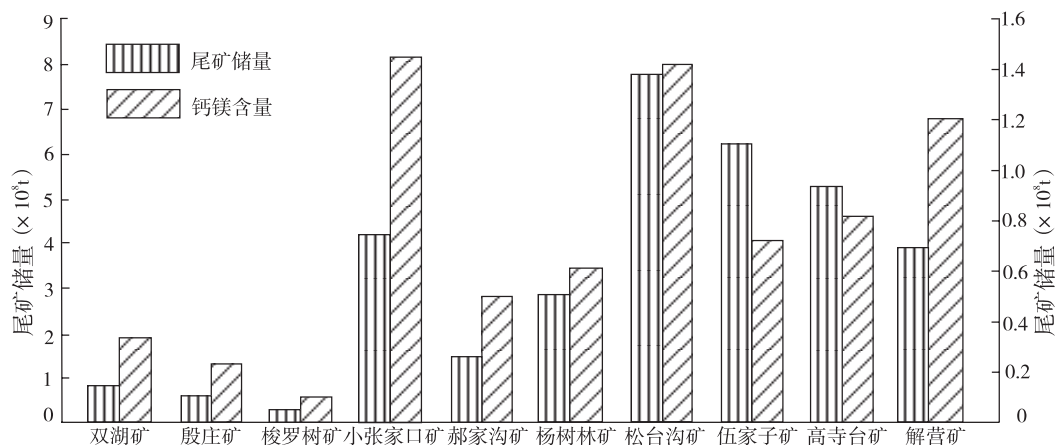


图4 不同矿床尾矿的储量分布

Fig. 4 Tailings resources of different ore deposits in studied areas

以蛇纹石为主，因此该岩带尾矿相比赤城—朝阳岩带尾矿而言利用效率较高；赤城—朝阳岩带尾矿的储量方面远大于东海—日照岩带，尾矿比表面积也相对较高，根据尾矿与CO<sub>2</sub>反应的方程式，赤城—朝阳岩带尾矿封存CO<sub>2</sub>量可达 $4.0 \times 10^8$  t，而东海—日照岩带尾矿仅为 $0.4 \times 10^8$  t。综合这些尾矿的化学成分、比表面积、储量等多方面因素，可以断定，赤城—朝阳岩带的铁镁质尾矿封存CO<sub>2</sub>的潜力巨大。

### 参考文献 (References) :

- 陈安国, 马配学, 李洪阳, 等. 1996. 河北省赤城县小张家口超基性岩体主要特征和时代[J]. 岩石学报, 12(1): 156–162.
- 樊金涛. 1996. 苏北东海晋宁期蛇绿岩与苏胶造山带演化[J]. 江苏地质, 20(1): 1–8.
- 李嘉, 周鲁, 李克锋, 等. 2003. 泥沙粒径分布函数的分形特征与吸附性能[J]. 泥沙研究, 3: 17–20.
- 吴利仁. 1963. 论中国基性、超基性岩的成矿专属性[J]. 地球化学, 1: 77–78.
- 王明星, 张仁键, 郑循华. 2000. 温室气体的源与汇[J]. 气候与环境研究, 5(1): 75–79.
- 邱克辉, 恭迎春, 张佩聪. 2009. 科学可持续发展攀枝花钒钛产业[J]. 钢铁钒钛, 3(30): 17–20.
- 邱克辉, 刘熙光, 张其春. 2002. 攀钢工业固体废弃物现状及处置对策初探[J]. 成都理工大学学报, 2(29): 209–212.
- 谢智, 陈江峰, 孙卫东, 等. 2007. 河北高寺台超镁铁岩体中钼矿物的钼同位素组成初步研究[J]. 中国科学技术大学学报, 37(8): 974–978.
- 张力, 王义文, 崔桂珍, 等. 2004. 辽宁北票北部金矿分布规律及找矿方向[J]. 黄金地质, 10(2): 21–27.
- Goldberg P, Chen Z Y, O'Connor W, et al. 2001. CO<sub>2</sub> mineral sequestration studies in US [C]//Proceedings of the First National Conference on Carbon Sequestration, session 6C, Washington D C: NETL: 1–10.
- Indermuhle A, Monnin E, Stauffer B, et al. 2000. Atmospheric CO<sub>2</sub> concentration from 60 to 20 kyrBP from the Taylor Dome ice core, Antarctica [J]. Geophysical Research Letters, 27: 735–738.
- Lackner K, Wend T C and Butt D. 1995. Carbon dioxide disposal in carbonate minerals [J]. Energy, 20: 4778–4802.
- Larachi F, Daldoul I and Beaudoin G. 2010. Fixation of CO<sub>2</sub> by chrysotile in low-pressure dry and moist carbonation: Ex-situ and in-situ characterizations [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 74: 3051–3075.
- Maroto-valer M M, Fauth D J and Kuchta M E. 2005. Activation of magnesium rich minerals as carbonation feedstock materials for CO<sub>2</sub> sequestration [J]. Fuel Processing Technology, 86: 1627–1645.
- Molson J W, Fala O, Aubertin M, et al. 2005. Numerical simulations of pyrite oxidation and acid mine drainage in unsaturated waste rock piles [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 78(4): 343–371.
- O'Connor W. 2001. Carbon dioxide sequestration by direct mineral carbonation: results from recent studies and current status [C]//Proceedings of the First National Conference on Carbon Sequestration, session 6C, Washington D C: NETL: 1–10.
- Sebastian T, Rein K and Carl-Johan F, et al. 2007. Production of magnesium carbonates from serpentinite for long-term storage of CO<sub>2</sub> [J]. International Journal of Mineral Processing, 85: 1–15.
- Sverdrup H. 1996. Geochemistry, the key to understanding environmental chemistry [J]. Science of the Total Environment, 183: 67–87.
- Teir S, Revitzer H, Eloneva S, et al. 2007. Dissolution of natural serpentinite in mineral and organic acids [J]. International Journal of Mineral Processing, 83: 36–46.
- Vaidya R U, Byler D E and Gallegos D E. 2001. Disposal of carbondioxide in mineral form [Z]//Proceedings of the 7th International Conference on Environmental Science and Technology, Vol C, Posters: 572–579.
- White A F, Blum A E, Schulz M S, et al. 1996. Chemical weathering rates of a soil chronosequence on granitic alluvium: I. Quantification of mineralogical and surface area changes and calculation of primary silicate reaction rates [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60(14): 2533–2550.
- Walters R P, Chen Z Y, Goldberg P, et al. 1999. Mineral carbonation: a viable method for CO<sub>2</sub> sequestration [C]//Proceedings of the Second AMUI Dixy Lee Ray Symposium. Washington, D C: American Society of Mechanical Engineers: 1–12.