The background of the slide is a dense field of small, translucent, yellowish-brown mineral grains, likely zircon or similar heavy minerals, which are commonly used in geochronology. The grains vary slightly in color and shape, creating a textured, granular appearance.

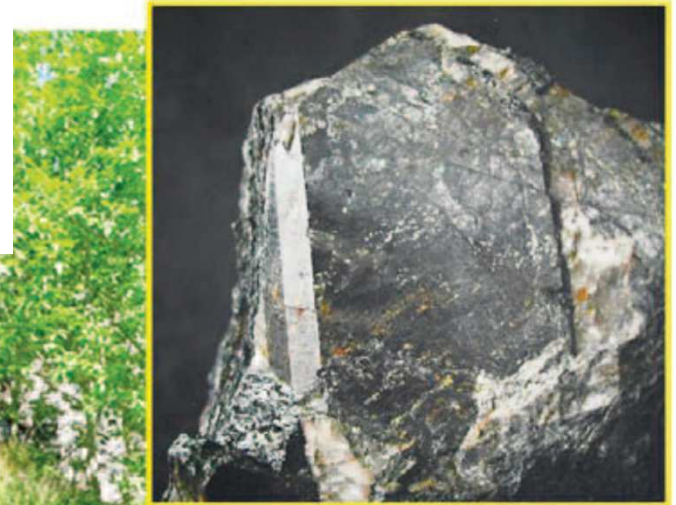
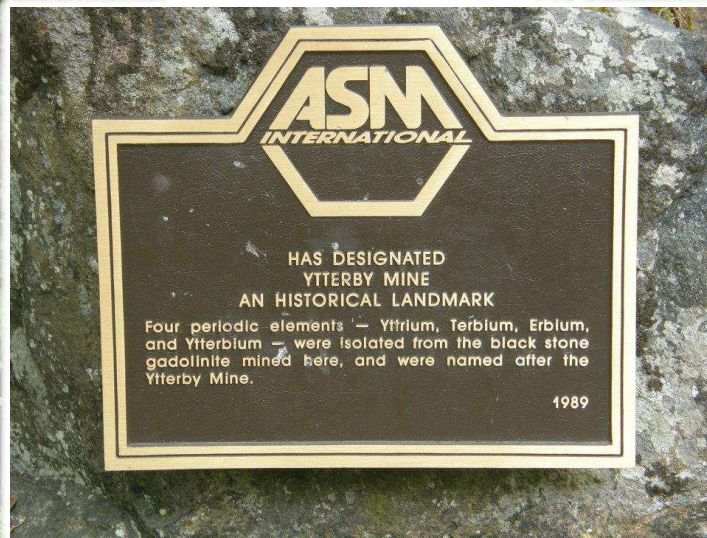
Geologia degli Rare Earth Elements

Rare Earth Elements

by Geology.com

H																	He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt										
LANTHANIDES																		
Actinides																		
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Nella seconda metà del 1700, C.A. Arrhenius scopre delle masse nerastre nella miniera di Ytterby vicino a Stoccolma. Successivamente J. Gadolin scopre che quella massa nerastra è un nuovo minerale (che successivamente prenderà il nome di Gadolinite) in cui è contenuto una nuova «terra» (1794). Nel 1828 verrà isolato l'ittrio in forma quasi pura, e successivamente il terbio, l'erbio e l'itterbio. L'ultima terra rara scoperta sarà il lutezio nel 1908.

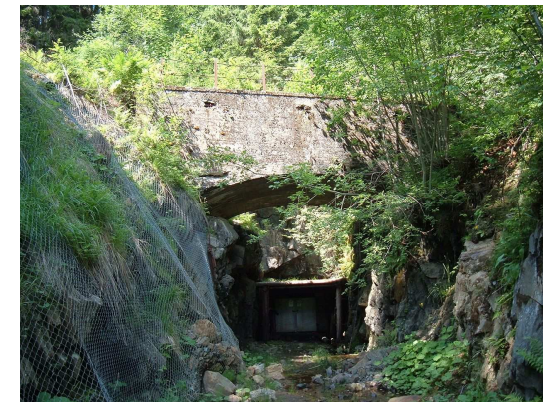


Minerali delle Terre Rare

Esistono tra i 270-290 minerali contenenti Y e terre rare come componenti essenziali all'interno della struttura, circa il 43% sono silicati, il 23% carbonati, il 14% sia ossidi che fosfati, Meno comuni sono i solfati.

TABLE 1 MAJOR RARE EARTH MINERALS

Mineral name ^a Formula	Relevant rare elements (range or max. value)	Major deposit type(s) ^c	Examples (past, present, and potential producers) ^c
Bastnäsite REECO ₃ (F,OH)	53–79 wt% \sum REO; ≤ 2.8 wt% ThO ₂	CRB; HMD	Bastnäs, SW; Mountain Pass, USA; Maoniuping, Weishan, and Bayan Obo, CH; Karonge Gakara, Burundi
Parisite CaREE ₂ (CO ₃) ₃ (F,OH) ₂	58–63 wt% \sum REO; ≤ 4.0 wt% ThO ₂	CRB; HMD	Mountain Pass, USA; Weishan and Bayan Obo, CH
Synchysite CaREE(CO ₃) ₂ (F,OH)	48–52 wt% \sum REO; ≤ 5.0 wt% ThO ₂	CRB; HMD associated with CRB and granites	Barra do Itapirapuã, BR; Luglin Gol, MN; Kutessay, KR
Ba–REE fluorocarbonates ^b Ba _x REE _y (CO ₃) _{x+y} F _y	22–40 wt% \sum REO; ≤ 0.7 wt% ThO ₂	HMD; CRB	Bayan Obo, CH
Monazite (REE,Th,Ca,Sr)(P,Si,S)O ₄ solid solution to cheralite (Ca,Th,REE)PO ₄	38–71 wt% \sum REO; ≤ 27 wt% ThO ₂ ; ≤ 0.8 wt% UO ₂	CRB; HMD; granitic pegmatites; Fe oxide–phosphate rocks; laterites; placers	Kangankunde, ML; Bayan Obo, CH; Steenkampskraal, SA; Mt. Weld, AU; Tomtor, RU; Tamil Nadu and Kerala, IN; Buena, BR; Nolans Bore and Eneabba, AU; Perak, MA
Xenotime (REE,Zr)(P,Si)O ₄	43–65 wt% \sum REO; ≤ 8.4 wt% ThO ₂ ; ≤ 5.8 wt% UO ₂	Granites and pegmatites; HMD associated with granites; laterites; placers; rarely CRB	Kutessay, KR; Pitinga, BR; Tomtor, RU; Mt. Weld, AU; Kinta and Selangor, MA Lofdal, Namibia
Churchite REEPO ₄ ·2H ₂ O	43–56 wt% \sum REO; ≤ 0.3 wt% ThO ₂	Laterites	Mt. Weld, AU; Chuktukon, RU
Fergusonite REENbO ₄	43–52 wt% \sum REO; ≤ 8.0 wt% ThO ₂ ; ≤ 2.4 wt% UO ₂	Granites and pegmatites; HMD associated with peralkaline rocks	Bayan Obo, CH; Nechalacho, CA
Loparite (Na,REE,Ca)(Ti,Nb)O ₃	28–38 wt% \sum REO; ≤ 1.6 wt% ThO ₂	Peralkaline feldspathoidal rocks	Lovozero, RU



Bastnas Mine - scoperto il Ce come ossido nel 1803, e il La nel 1839.

Abbreviations: CRB = carbonatites, HMD = hydrothermal-metasomatic deposits; AU = Australia, BR = Brazil, CA = Canada, CH = China, IN = India, KR = Kyrgyzstan, MA = Malaysia, ML = Malawi, MN = Mongolia, RU = Russia, SA = South Africa, SW = Sweden; REE = rare earth element(s), REO = rare earth oxide(s)

Minerali delle Terre Rare

Oltre ai minerali delle terre rare veri e propri, esistono molti altri minerali in cui questi elementi possono sostituire anche abbondantemente altri cationi di carica e raggio comparabile.

Tra questi minerali ci sono ad esempio:

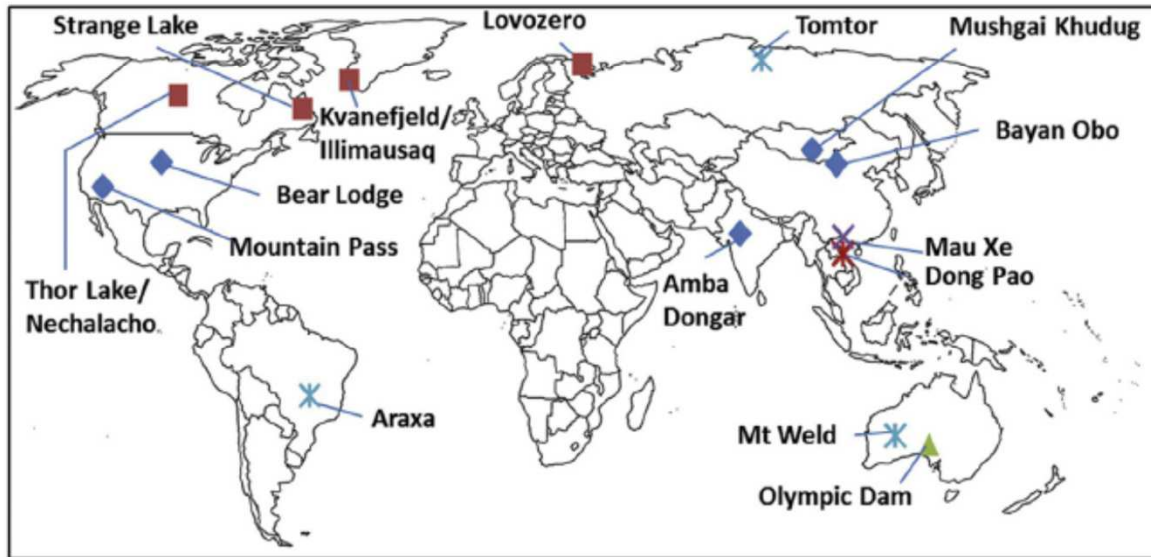
- Mosandrite $[(Ca, Na)_{3-x}(Ca, REE)_4Ti(Si_2O_7)_2(OH, F, H_2O)_4 \cdot H_2O]$
- Apatite $[(Ca, REE, Sr, Na)_5(P, Si)_3O_{12}(F, OH, Cl)]$
- Ewaldite $[Ba (Ca, Na, REE)(CO_3)_2 \cdot nH_2O]$
- Perovskite $[(Ca, Na, REE)(Ti, Nb, Fe)O_3]$

In questi minerali il contenuto di REE si aggira su $1-2 \times 10^5$ ppm.

In base alle condizioni di cristallizzazione, contenuti elevati di REE, possono essere presenti anche nella titanite ($CaTiSiO_5$), zircone $ZrSiO_4$, pirocloro $[Ca, Na)_{2-x}(Nb, Ti)_2O_6(F, OH)]$.

Inoltre esistono le cosiddette ion-adsorption clays ovvero argille ad adsorbimento ionico in cui si hanno contenuti di REE tra lo 0.05 e lo 0.2%. Il 70% di questo contenuto è in forma di cationi adsorbiti sulla superficie dei fillosilicati secondo un meccanismo peraltro poco chiaro.

Depositi delle Terre Rare



- ◆ Carbonatite and related
- Alkaline igneous (silicate)
- ✕ Metamorphism
- ✕ Laterite (carbonatite)
- ✕ Laterite (syenite)
- ▲ IOCG

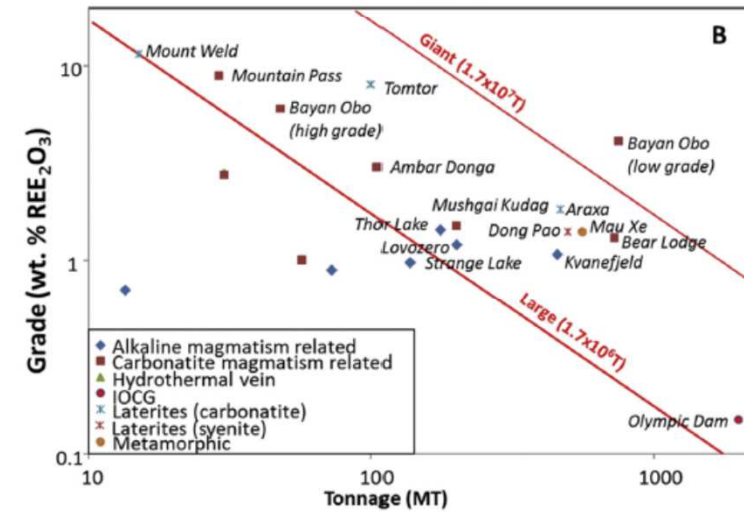
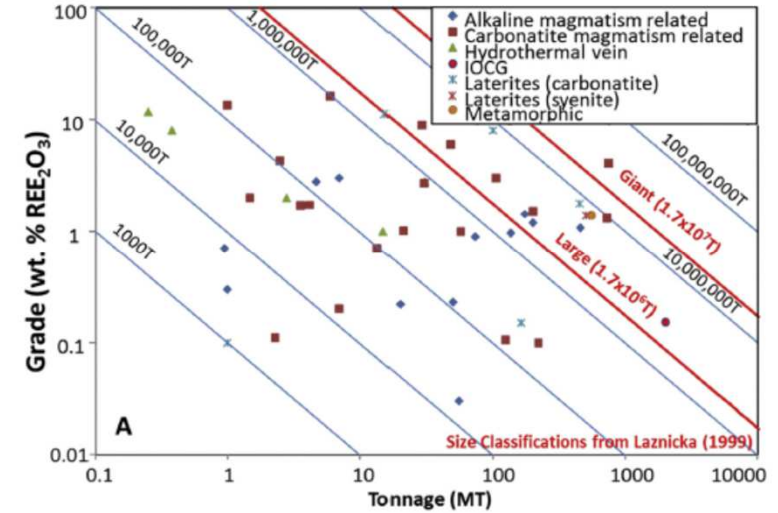


Figure 1. Grade-tonnage plot for resource estimates in REE deposits from Orris and Grauch (2002) and Long et al. (2010). Size classifications after Laznicka (1999) calculated as described in the text.

Depositi delle Terre Rare

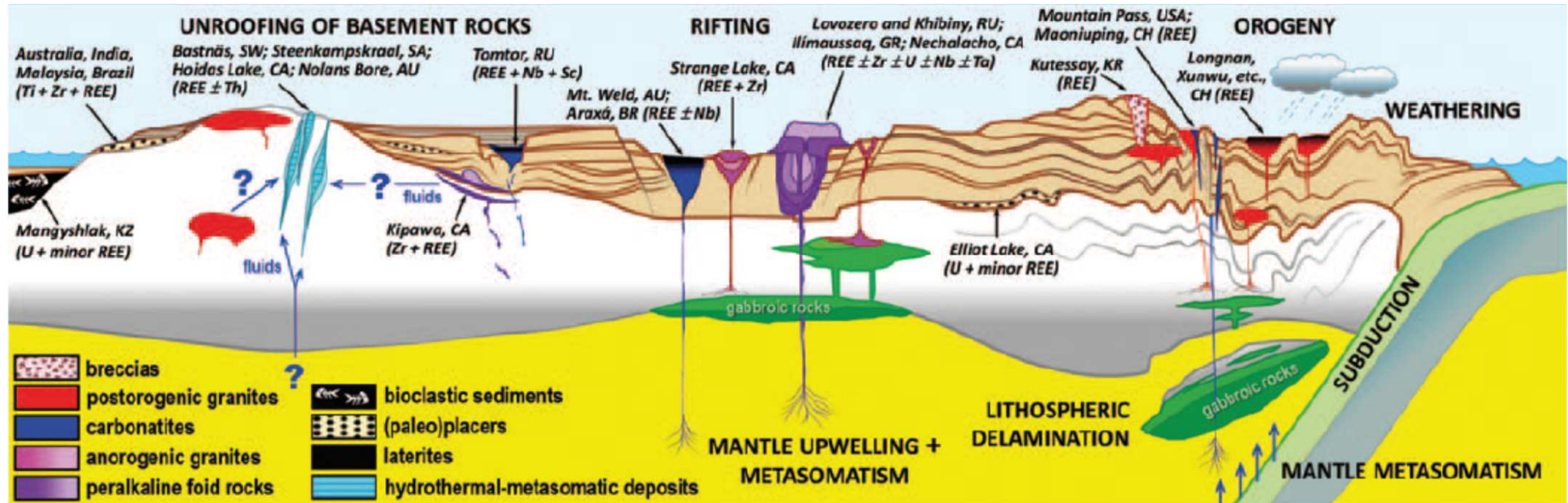


FIGURE 5 Major REE deposit types in a tectonic context. Rock types are given in the legend; processes are shown in capital letters; and past, present, and potential producers are in italics (KZ = Kazakhstan; for other abbreviations, see TABLE 1). Bayan Obo, although the world's largest REE deposit, is one of the least well understood (Kynicky et al. 2012) and is not indicated on this diagram.

Depositi delle Terre Rare

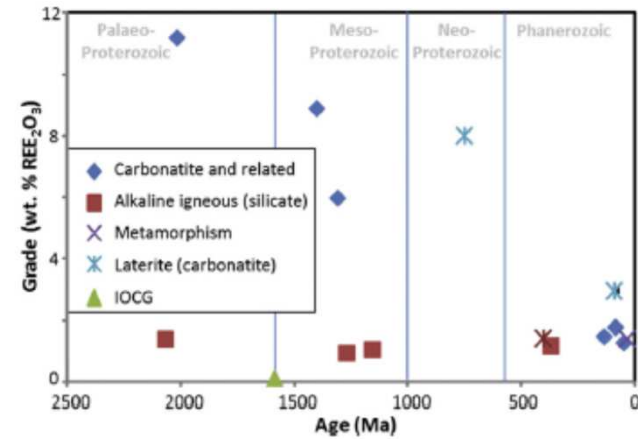
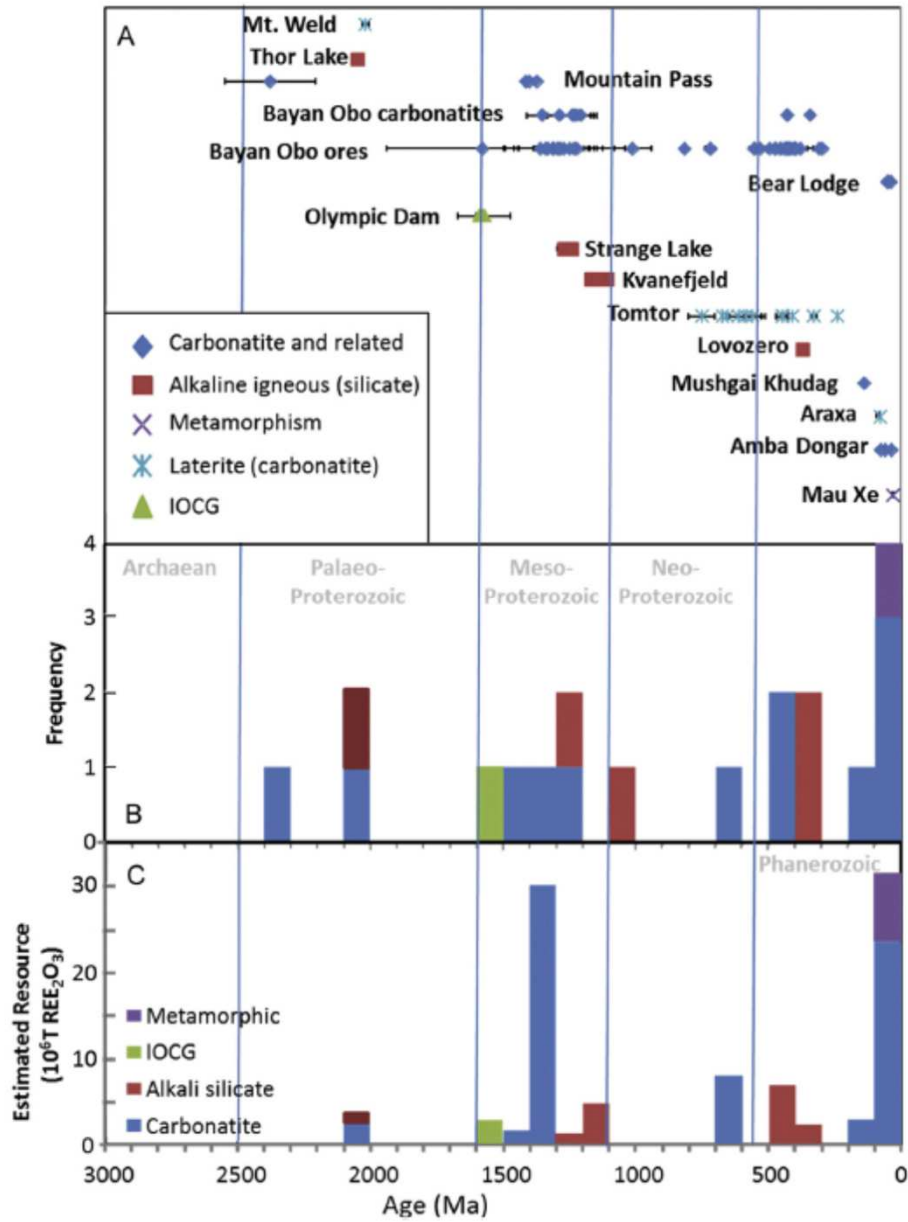


Figure 7. Comparison of deposit age with grade.

Depositi delle Terre Rare: Rocce Ignee

Fondamentalmente le rocce ignee in cui si possono trovare depositi di REE sono:

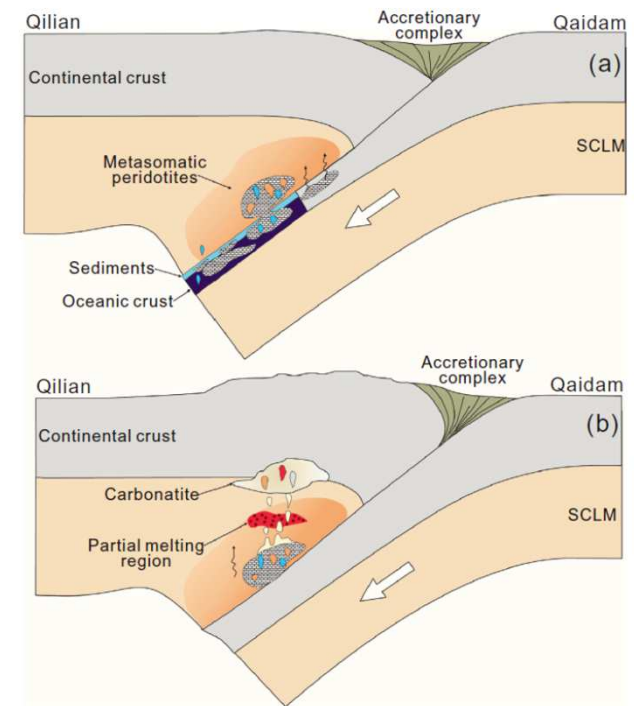
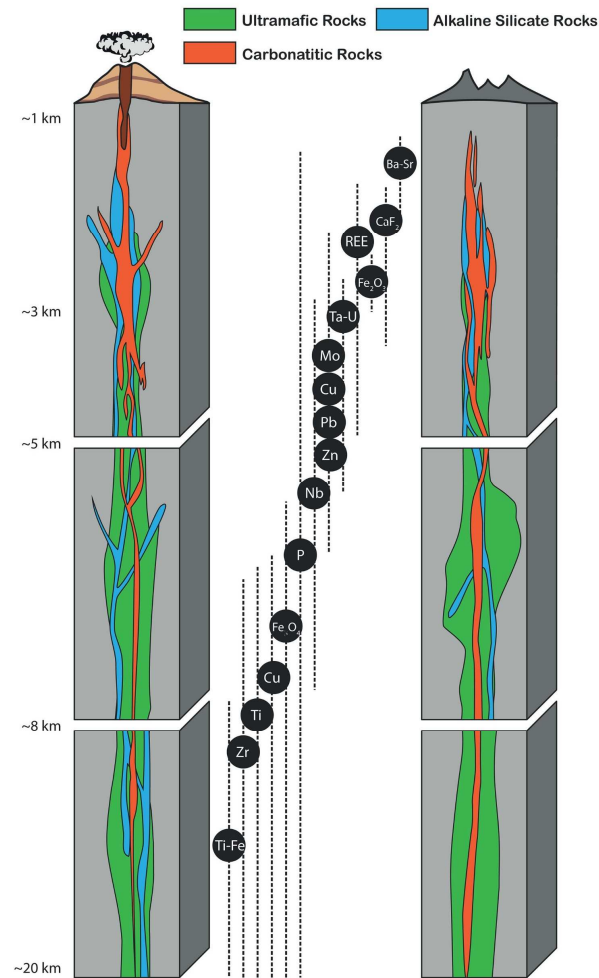
- Carbonatiti
- Rocce peralcaline sottosature in silice
- Graniti peralcalini e pegmatiti
- Pegmatiti associate a graniti sub- e meta- alluminiferi
- Depositi di ossidi di Fe e fosfati

Depositi delle Terre Rare: Carbonatiti

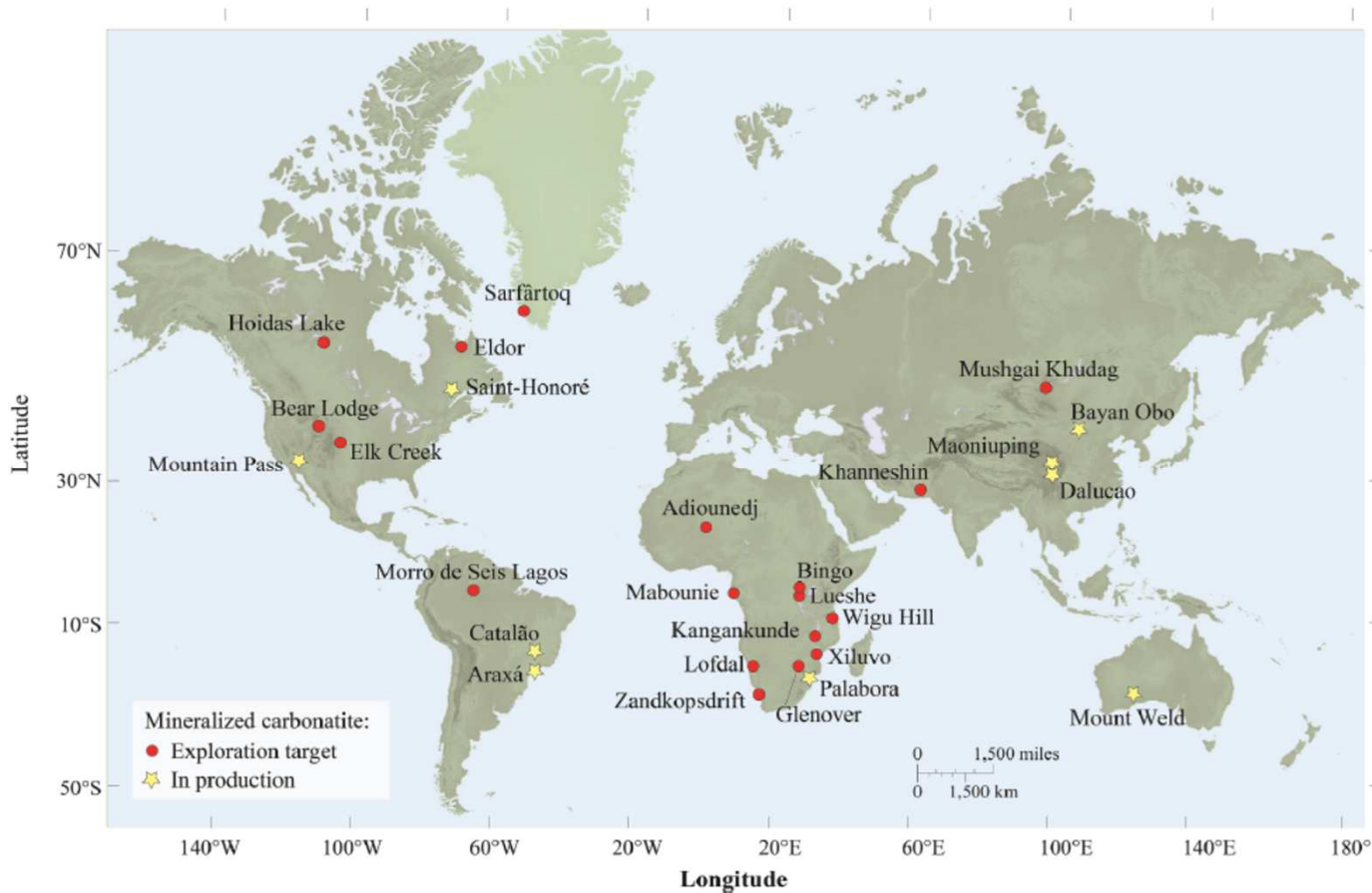
Con il termine carbonatite si fa riferimento ad una roccia magmatica (intrusiva, o effusiva) in cui le fasi minerali carbonatiche sono pari o superiori al 50%.

Nel caso il contenuto in silice sia inferiore al 20% in peso si parlerà di carbonatite s.s. mentre per tenori superiori al 20%, le rocce vanno identificate come SILICO CARBONATITI.

Nel caso la silice superi il 50% in peso, la nomenclatura di riferimento è quella delle rocce magmatiche silicatiche, ma la frazione carbonatitica "obbligatoriamente" aggettiva la roccia studiata.



Depositi delle Terre Rare: Carbonatiti

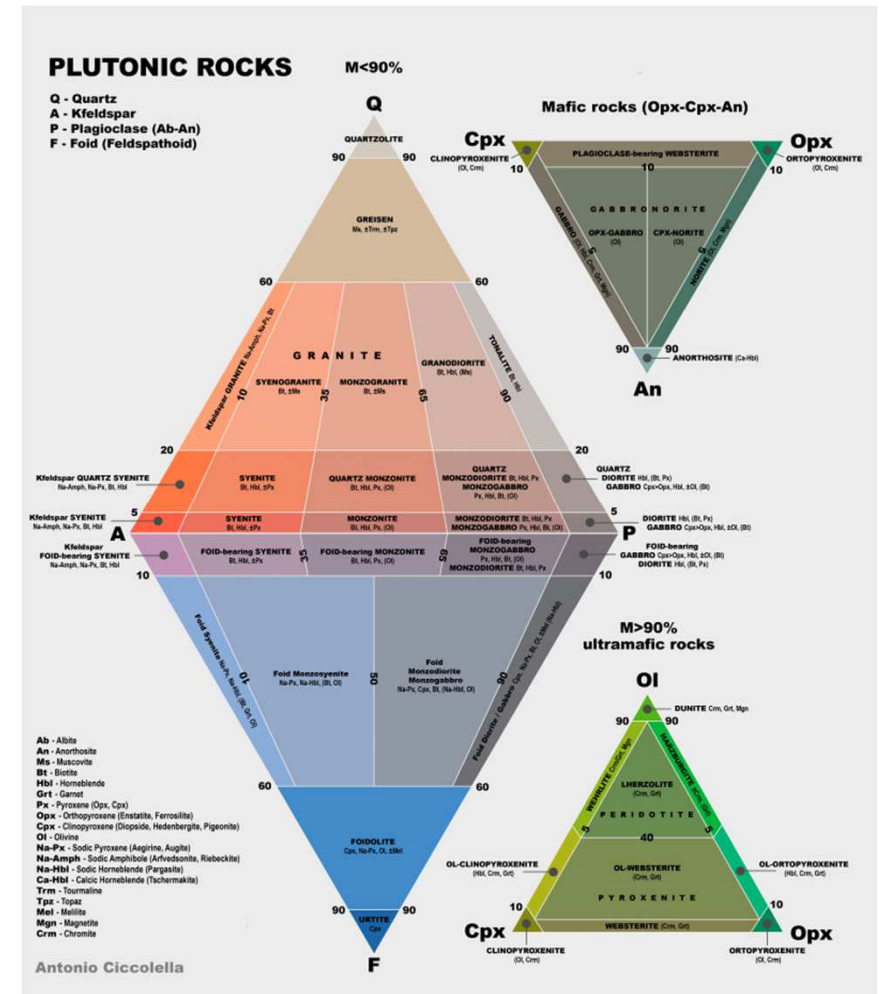
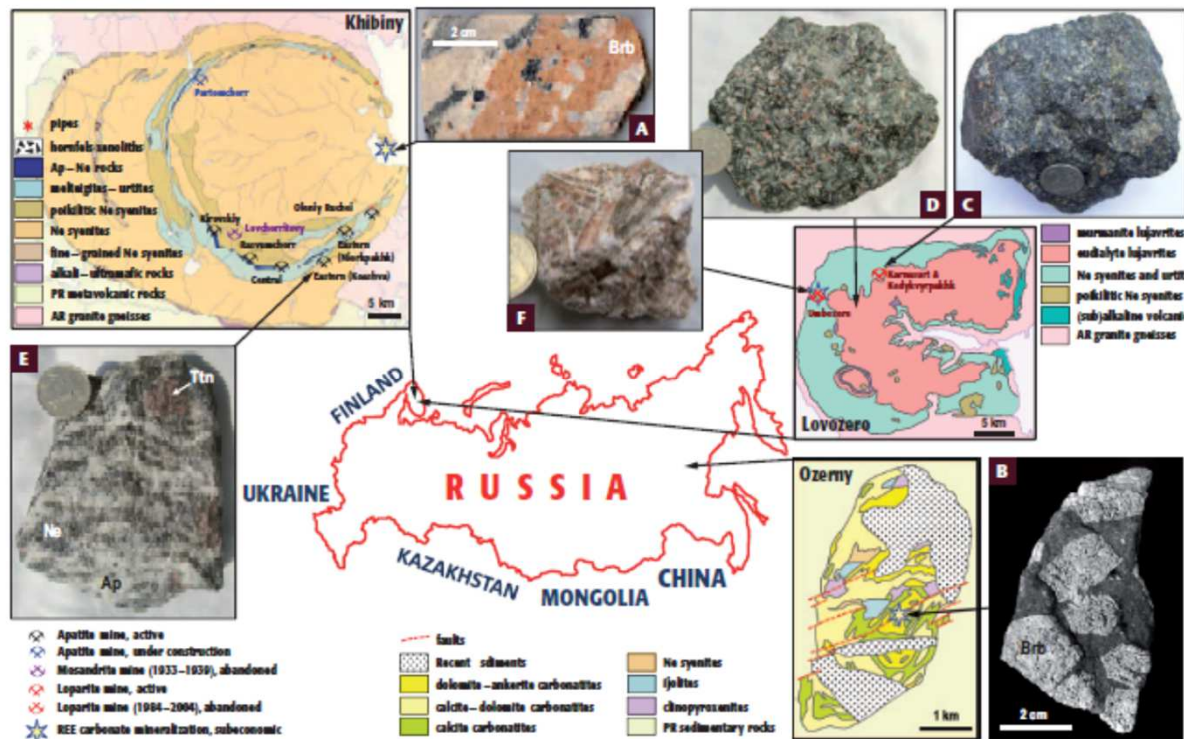


Le carbonatiti hanno un contenuto in REE maggiore rispetto alle altre rocce dove possono essere contenuti questi elementi. I tenori di REE vanno da 250 a 8000 ppm. In genere le LREE sono più abbondanti delle HREE. A parte i minerali di REE, le REE sono distribuite tra carbonati, fosfati, ossidi e fasi silicatiche.

Fig. 1. Global carbonatite distribution including deposit in production and exploration targets (Sources: Eggert et al., 2016; Verplanck et al., 2016).

Depositi delle Terre Rare: Rocce Peralcaline Sottosature

Le serie peralcaline sono rappresentate da rocce alte in potassio ($K_2O > 3\%$ wt.; $MgO > 3\%$ wt) con rapporti $K_2O/Na_2O > 2$ e alte in sodio.



Depositi delle Terre Rare: Rocce Peralcaline Sottosature

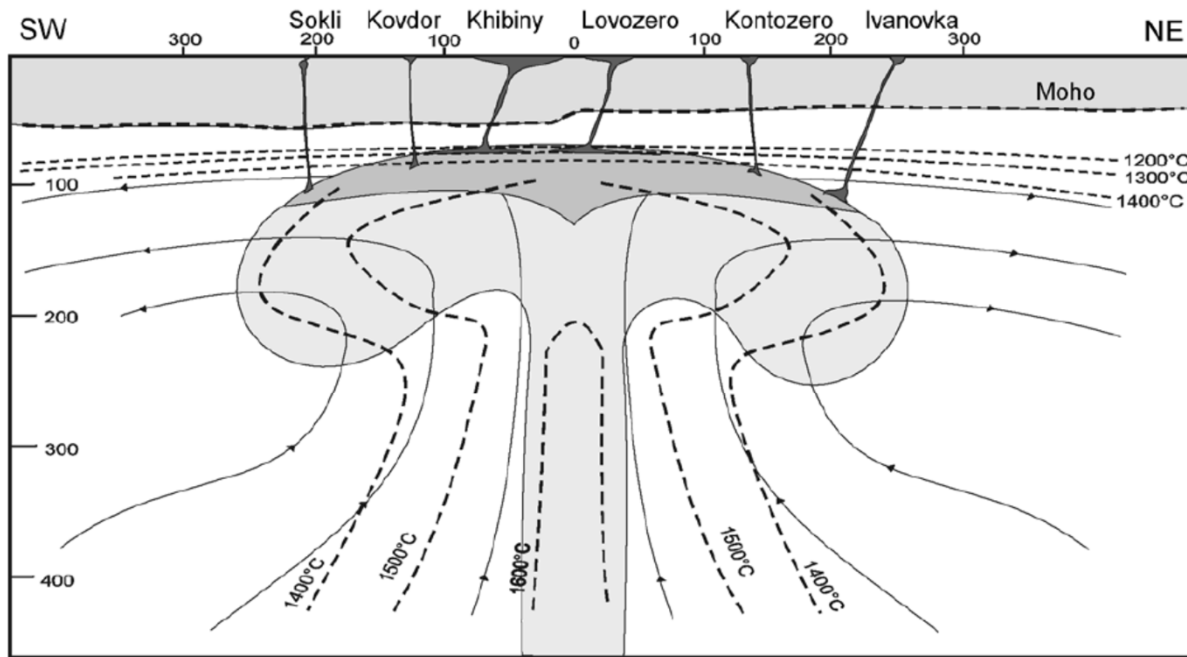


Figure 13. A hypothetical model for the mantle plume–lithosphere interaction in the zone of the Paleozoic alkaline magmatism in the northeastern part of the Baltic Shield, based on the data of *Leitch et al.* [1998], *McKenzie and Bickle* [1988], *Thompson and Gibson* [1991], and *White and McKenzie* [1989].

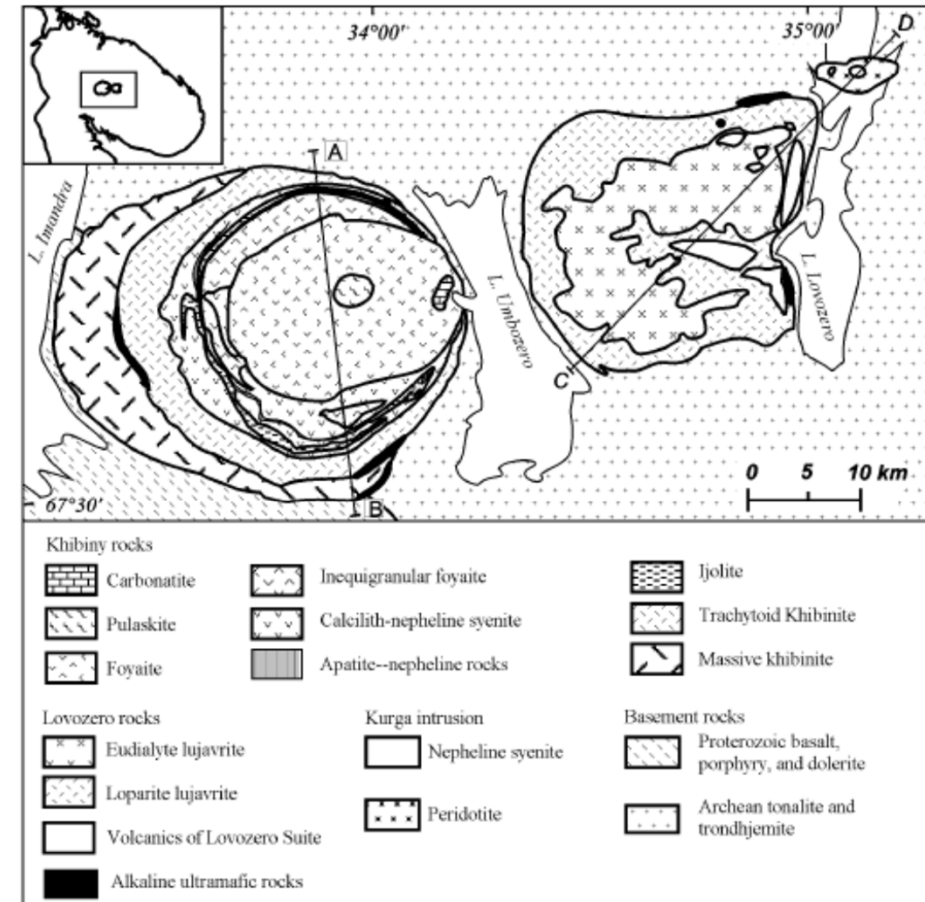


Figure 5. Schematic map showing the geologic structure of the Khibiny and Lovozero plutons based on the data reported by *Bussen and Sabharov* [1972], *Galakhov* [1975], and *Gerasimovskii et al.* [1966] and the results of this study.

Depositi delle Terre Rare: Rocce Peralcaline Sottosature

Rispetto alle carbonatiti in queste rocce mancano la monazite e gli REE-carbonati

La maggior parte delle terre rare è contenuta in fosfati del gruppo della apatite, zircono e titanosilicati (gruppo dell'eudialite,
 $[Na_{15}Ca_6(Fe,Mn)_3Zr_3(Si,Nb)(Si_{25}O_{73})(O,OH,H_2O)_3(Cl,OH)_2]$)
 mentre fasi tipo perovskite e pirocloro sono più rare.

La loparite $(Ce,Na,Ca)_2(Ti,Nb)_2O_6$ è stata la maggior sorgente di LREE, Nb e Ta dell'industria dell'Unione Sovietica dal 1951.



Table 1. Examples of the REE distribution in eudialytes of the Lovozero deposit

Sample no.	The depth of the Lovozero deposit	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	Ce/Yb
Eudalite 1a	196	1188	2548	367	1973	653	217	718	137	666	144	395	57	382	49	9494	6.66
Eudalite 1b	196	1505	3205	422	1991	617	199	607	115	731	147	395	56	365	46	10399	8.77
Eudalite 1c	196	1393	3011	405	2106	704	223	716	138	814	164	445	64	421	54	10659	7.16
Eudalite 2a	135	1751	3538	472	2366	778	269	802	153	905	187	506	72	472	60	12331	7.50
Eudalite 2b	135	2087	4389	583	2864	901	293	861	159	901	179	475	66	434	55	14249	10.11
Eudalite 2c	135	1925	3959	529	2619	839	276	847	158	910	184	487	68	440	55	13297	9.00
Eudalite 3a	178	2079	3939	497	2313	744	257	769	150	895	187	517	74	487	62	12971	8.08
Eudalite 3b	178	1820	3607	470	2320	764	269	799	154	895	187	507	72	467	60	12391	7.73
Eudalite 3c	178	2031	3946	508	2460	815	278	833	163	959	199	542	76	501	64	13376	7.88
Eudalite 4a	96	1687	3389	436	2071	639	215	616	112	635	129	339	47	308	39	10661	11.02
Eudalite 4b	96	2164	4735	631	3155	873	241	712	110	543	94	224	29	177	21	13708	26.79
Eudalite 4c	96	2144	4535	587	2816	826	265	766	136	749	147	393	54	356	45	13820	12.74
NIST610-3	63	1537	3300	434	2068	606	203	566	104	582	116	306	43	283	36	10184	11.65
Eudalite 5b	5	1107	2320	306	1460	443	138	387	69	442	86	226	31	196	24	7235	11.83
Eudalite 5c	63	1385	2988	395	1930	583	189	569	105	592	117	308	43	279	36	9519	10.71
Eudalite 6a	63	2645	5870	748	3454	906	273	760	128	654	120	298	40	252	30	16177	23.32
Eudalite 6b	5	1810	3664	470	2242	694	231	699	129	751	150	396	55	348	43	11681	10.54
Eudalite 6c	5	3381	6850	841	3741	971	301	825	140	752	144	368	50	324	39	18729	21.16
Eudalite 7a	5	2409	4838	604	2802	802	247	737	133	740	145	377	52	338	43	14265	14.33
Eudalite 7b	245	2177	4355	560	2704	859	289	902	178	1066	226	633	91	609	81	14729	7.15
Eudalite 7c	245	2855	5833	743	3530	1077	337	1029	198	1142	240	651	93	626	83	18435	9.32
Eudalite 8a	295	2162	4359	547	2642	853	281	906	184	1112	240	682	101	664	88	14819	6.56
Eudalite 8b	295	2144	4383	564	2705	872	291	913	184	1099	236	665	97	648	86	14885	6.76
Eudalite 8c	295	2303	4397	537	2466	779	252	869	177	1085	235	663	96	640	84	14583	6.87
Eudalite 9a	287	1373	2703	340	1591	502	161	513	100	703	149	413	59	388	49	9045	6.97
Eudalite 9b	287	1940	3869	486	2352	776	254	839	169	1016	221	614	89	601	79	13304	6.44
Eudalite 9c	287	2308	4484	546	2553	785	265	811	161	985	212	590	86	570	76	14432	7.87
Eudalite 10a	304	2365	4692	590	2824	911	311	955	192	1169	255	719	107	715	95	15900	6.56
Eudalite 10b	304	1964	3998	511	2477	798	278	857	170	1056	230	642	93	616	81	13772	6.49
Eudalite 10c	304	2225	4431	570	2762	885	295	937	189	1138	244	693	101	672	89	15229	6.60
Eudalite 11a	377	1845	3692	462	2157	655	223	711	143	888	195	562	82	541	72	12227	6.82
Eudalite 11b	377	1976	3774	457	2106	624	199	661	134	842	186	531	77	514	68	12151	7.34
Eudalite 11c	377	1663	3467	442	2059	609	207	601	114	668	138	370	53	349	46	10788	9.92
Eudalite 12a	-1509	1388	2313	260	1112	312	98	283	48	290	53	134	18	111	14	6434	20.75
Eudalite 12b	-1509	1404	2493	310	1479	476	159	454	82	438	85	223	30	202	26	7861	12.37
Eudalite 12c	-1509	1538	2713	332	1571	523	170	509	92	517	104	270	37	241	30	8648	11.24
Average values		1935	3905	499	2384	735	240	732	139	815	169	460	66	432	56	12566	10.36

Depositi delle Terre Rare: Graniti peralcalini e pegmatiti associate

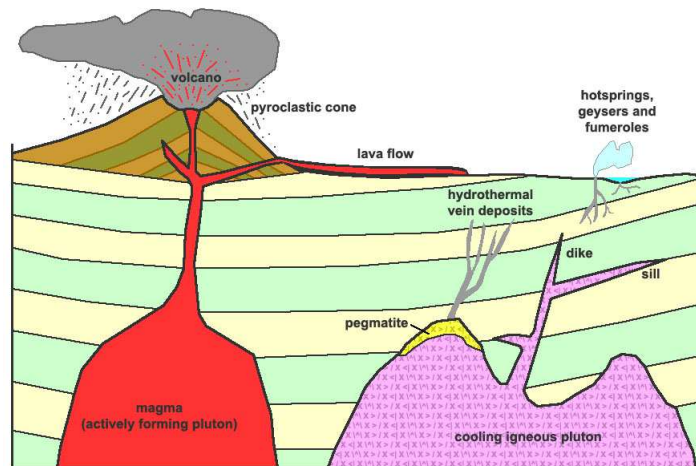
Esistono diversi tipi di rocce granitoidi che differiscono per contenuto di Al, alcali e calcio. Le concentrazioni più alte (300-800 ppm) si trovano in graniti peralcalini anorogenici e nelle pegmatiti associate. In genere queste rocce sono arricchite in HREE. I minerali che contengono REE in queste rocce sono monazite, allanite, xenotimo, fergusonite, samarskite, gagarinite oltre a zirconsilicati (da zircone a eudialite) e pirocloro. I giacimenti più importanti di questo tipo sono Strange Lake e la miniera a Sn-Nb-Ta di Pitinga in Brasile



Depositi delle Terre Rare: Graniti peralcalini e pegmatiti associate

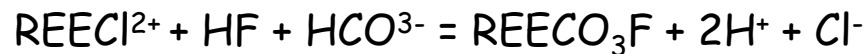
Le pegmatiti sono rocce filoniane che si trovano sia all'interno sia alla periferia di intrusioni granitiche, caratterizzate da struttura a grana grossa, talora gigantesca, e dalla presenza di minerali rari o poco comuni, talvolta di grande interesse economico e rappresentano il prodotto della cristallizzazione dell'ultimo residuo fluido ricco di silicati, rimasto dopo la solidificazione della parte principale di una intrusione magmatica.

Per questo motivo vi si trovano minerali del cui reticolo fanno parte sostanze volatili come acqua, cloro e fluoro oltre ad elementi con raggio ionico molto diverso da quello degli elementi comuni presenti nelle rocce, e che non hanno potuto trovare posto nei reticoli dei minerali separati negli stadi di alta temperatura (B, Ba, Rb, Cs, REE).



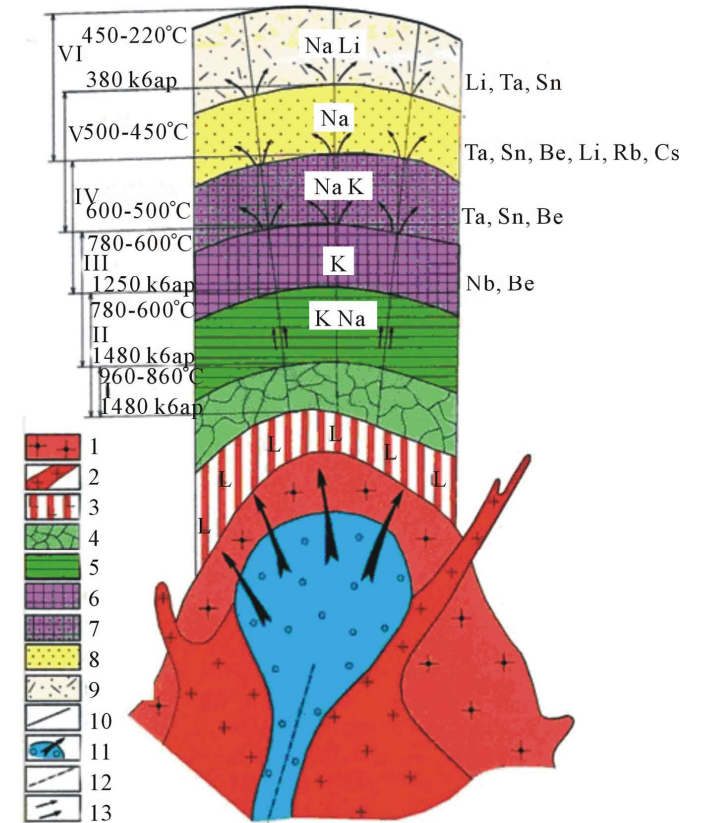
Depositi delle Terre Rare: Graniti peralcalini e pegmatiti associate

In ambiente acquoso le REE tenderanno a formare i complessi più stabili secondo $F^- > OH^- > NO_3^- > Cl^- > Br^-$ se consideriamo specie monovalenti. Altrimenti potranno seguire quest'ordine $CO_3^{2-} > SO_4^{2-} > P_2O_5^{2-}$. In un ambiente acquoso ricco in F oppure in Cl, il comportamento degli REE è sostanzialmente simile con gli LREE più stabili rispetto agli HREE. In ogni caso la stabilità di questi legami sarà più bassa al di sopra dei 150°C. Ad esempio la deposizione di bastnäsité-(Ce) può essere descritta dalla reazione



Qualsiasi meccanismo che aumenti il pH e/o l'attività dei carbonati o porti ad una diminuzione dell'attività del Cl porterà alla deposizione del minerale

A model formation pegmatite rare deposits. 1— coarse-and medium-biotite granite; I phase and 2—fine-and medium-grained muscovitized granite, II phase kalba complex (P₁); 3—aplite-like, aplite; 4 - 10—pegmatites (4— oligoclase-microcline barren, 5—grafic, 6—microcline in blocks with beryl and columbite 7—microcline-albite with tantalite, cassiterite, beryl (rarely spodumene), 8—albitic (productive) with tantalite, cassiterite, beryl, pollucite, spodumene, lepidolite; 9— albite (cleavelandite)-spodumene, with tantalite, amblygonite, petalite, polychromatic tourmaline; 10—faults; 11, 13—direction of the fluid movement; 12 —ore-controlling deep fault.



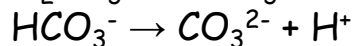
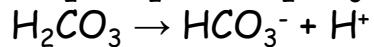
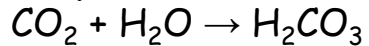
Depositi delle Terre Rare: Depositi di ossidi di ferro e fosfati

I depositi di ossidi di ferro e fosfati (\pm Ti) sono associati a diverse rocce ignee (sia acide che basiche) e di conseguenza hanno diversi tipi di origine. Il minerale principale per l'estrazione di REE è l'apatite e in alcuni casi xenotimo e monazite. A parte la miniera di Mineville (USA) questi depositi non sono economici per uno sfruttamento esclusivo delle terre rare. In questo caso lo sfruttamento è legato principalmente all'apatite (quindi ai fosfati) e le REE sono considerate un by-product.

Depositi secondari delle Terre Rare: Bauxite

La bauxite è una roccia sedimentaria, costituita essenzialmente da ossidi di alluminio idrati, di colore giallo o rosso mattone, usata come materia prima per l'estrazione dell'alluminio. Questi depositi si formano principalmente per alterazione di rocce contenenti minerali di alluminio, in cui gli altri elementi inizialmente presenti vengono allontanati per alterazione fisica e chimica seguendo questi steps.

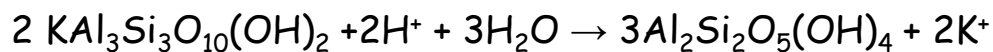
Step 1: acidificazione dell'acqua meteorica



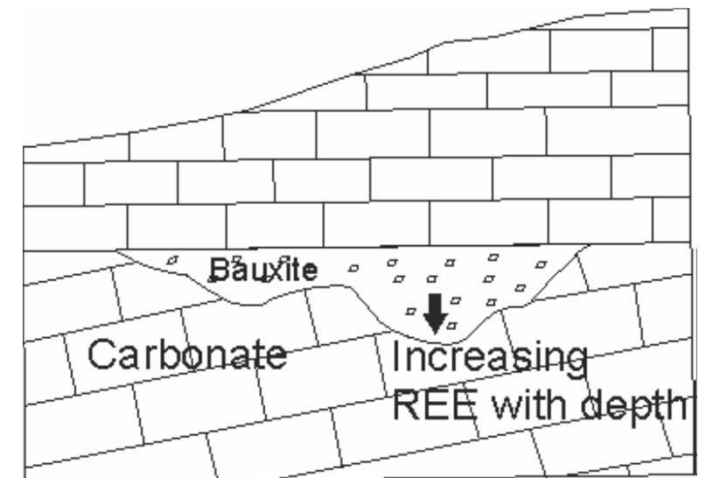
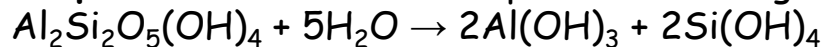
Step 2: Acidi carbonici e humus (dal suolo) reagiscono con il feldspato, rimuovono potassio e silice, e idratano la struttura allumosilicatica formando un'argilla tipo illite:



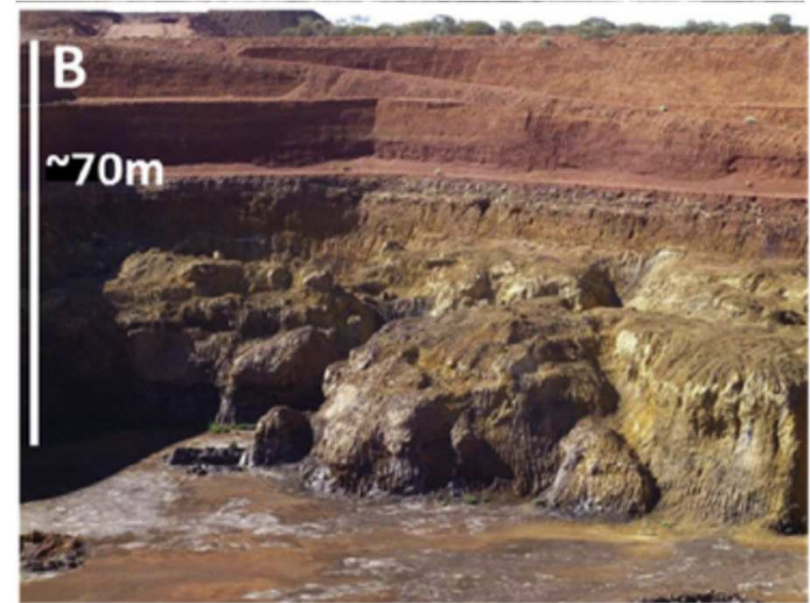
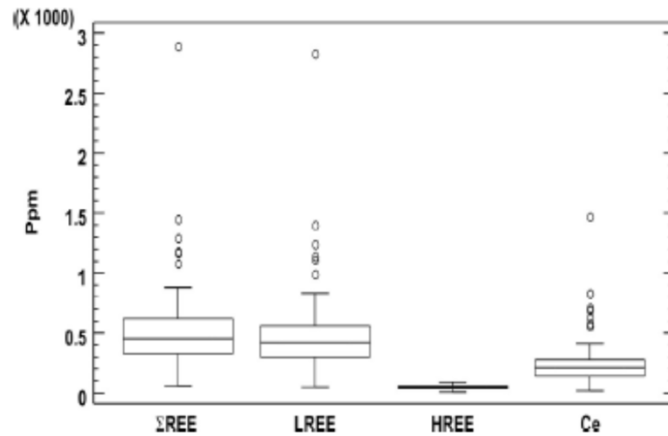
Step 3: ulteriore lisciviazione rimuove il potassio rimanente e trasforma l'illite in caolinite:



Step 4: la caolinite si decompone formando gibbsite e silice idrata:



Depositi secondari delle Terre Rare: Bauxite & Laterite

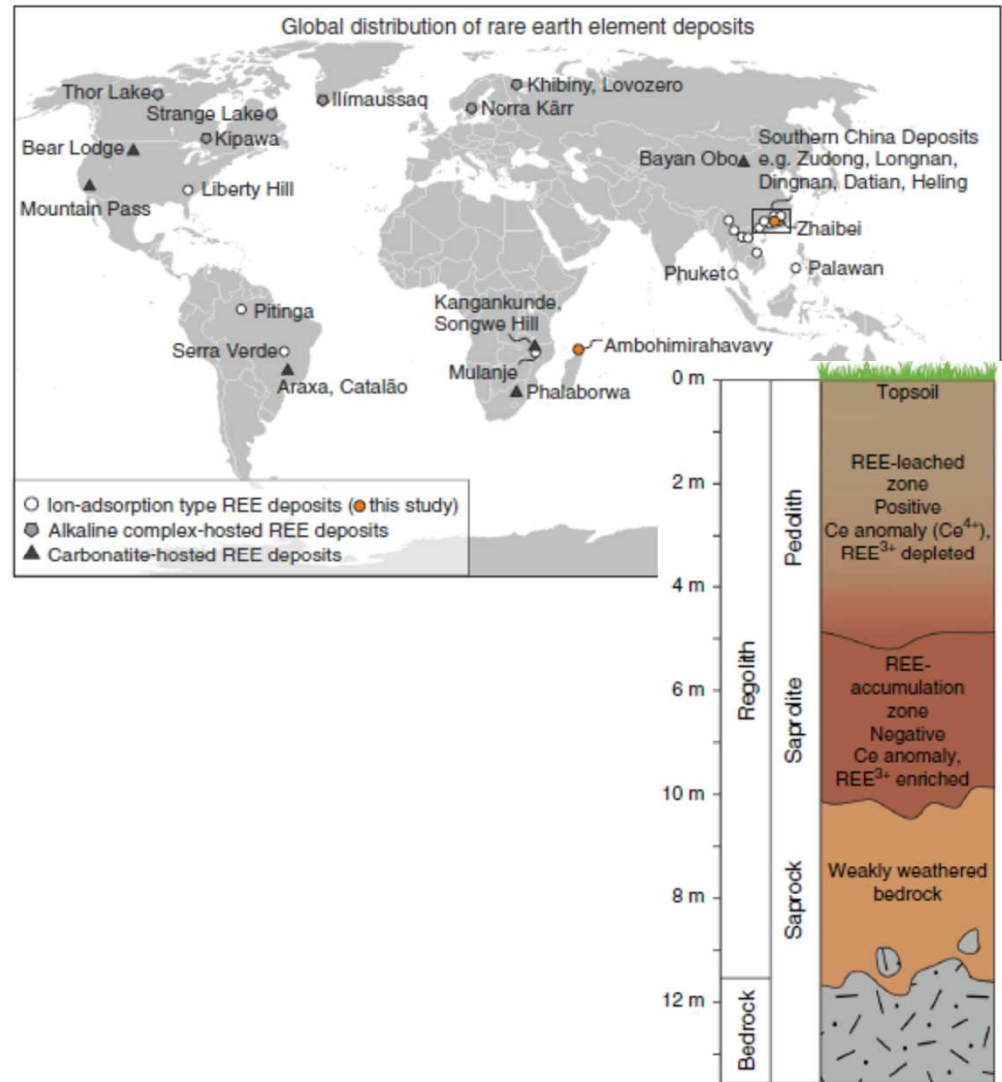


Sampling site	Major oxides			Critical raw materials (CRMs)																	ΣREE	LREE	HREE						
	SiO ₂ (wt.%)	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂ (ppm)	V	Cr	Co	Nb	Ni	Y	Sc	Ga	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb				Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Median	12.00	64.68	3.79	3.92	449	583	5	76	60	60	42	76	15.5	34.0	nd	12.0	3.4	1.2	nd	nd	nd	nd	nd	1.2	7.1	1.1	75.5	64.9	10.6
Min.	0.4	15.5	1.4	0.7	140.9	123.6	5.3	14.5	59.7	25.0	16.0	14.7	10.6	24.0	7.7	9.0	2.7	1.1	4.5	0.9	5.6	1.2	3.7	0.5	3.4	0.3	55.9	46.3	6.6
Max.	43.6	75.7	40.8	5.4	876.8	1130.0	348.9	129.0	1072.0	143.0	110.0	94.0	644.0	1470.0	55.3	604.0	117.0	25.5	30.3	4.0	20.6	3.8	10.9	9.2	15.8	2.3	2887.8	2835.0	85.9
Std.	9.2	9.8	7.6	0.9	156.9	269.1	40.7	26.3	165.5	18.4	14.4	11.9	74.6	199.7	9.1	64.4	12.3	2.7	4.7	0.6	3.0	0.5	1.4	0.9	1.9	0.3	343.2	335.6	16.6

1 = data from Mongelli et al., 2014; 2 = data from Mongelli et al., 2016; 3 = unpublished data; 4 = data from Mondillo et al., 2011; 5 = data from Boni et al., 2013; 6 = data from Marneli et al., 2017; nd = not detected; Min = minimum value; Max = maximum value; std. = standard deviation. Bold numbers indicate the outlier values.

Depositi secondari delle Terre Rare: Ion-adsorption clays

Queste argille si formano tramite un fenomeno di alterazione di rocce acide contenenti REE con formazione di lateriti. In seguito a questi processi di alterazione si ha la disintegrazione di molti dei minerali presenti ad eccezione del quarzo e di alcuni minerali stabili. In questi processi si sviluppano delle argille (similmente a quello che succede con le bauxiti). All'interno del protolite si possono trovare REE fluorocarbonati (bastnäsite, parisite and synchysite), fosfati (monazite, apatite e, raramente, xenotime), ossidi (piroclore, aeschynite e altre fasi a Nb-Ti phases), e allanite. In alcuni casi questi minerali possono resistere all'alterazione, ma molto più spesso si formano delle fasi secondarie a REE. Durante questi processi gli REE possono essere assorbiti sulle superfici dei minerali argillosi.



Depositi secondari delle Terre Rare: Ion-adsorption clays

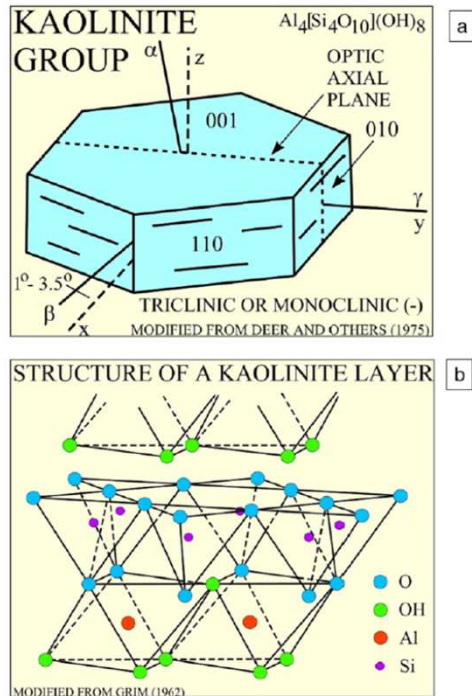


Fig. 7. Lattice structure of kaolinite. a) The crystallographic orientation of the optical axes and the labeling of faces using the Miller's indices. b) The layer structure of the kaolinite-group phyllosilicates.
Source: USGS Coastal and Marine Program (download from the internet 2016).

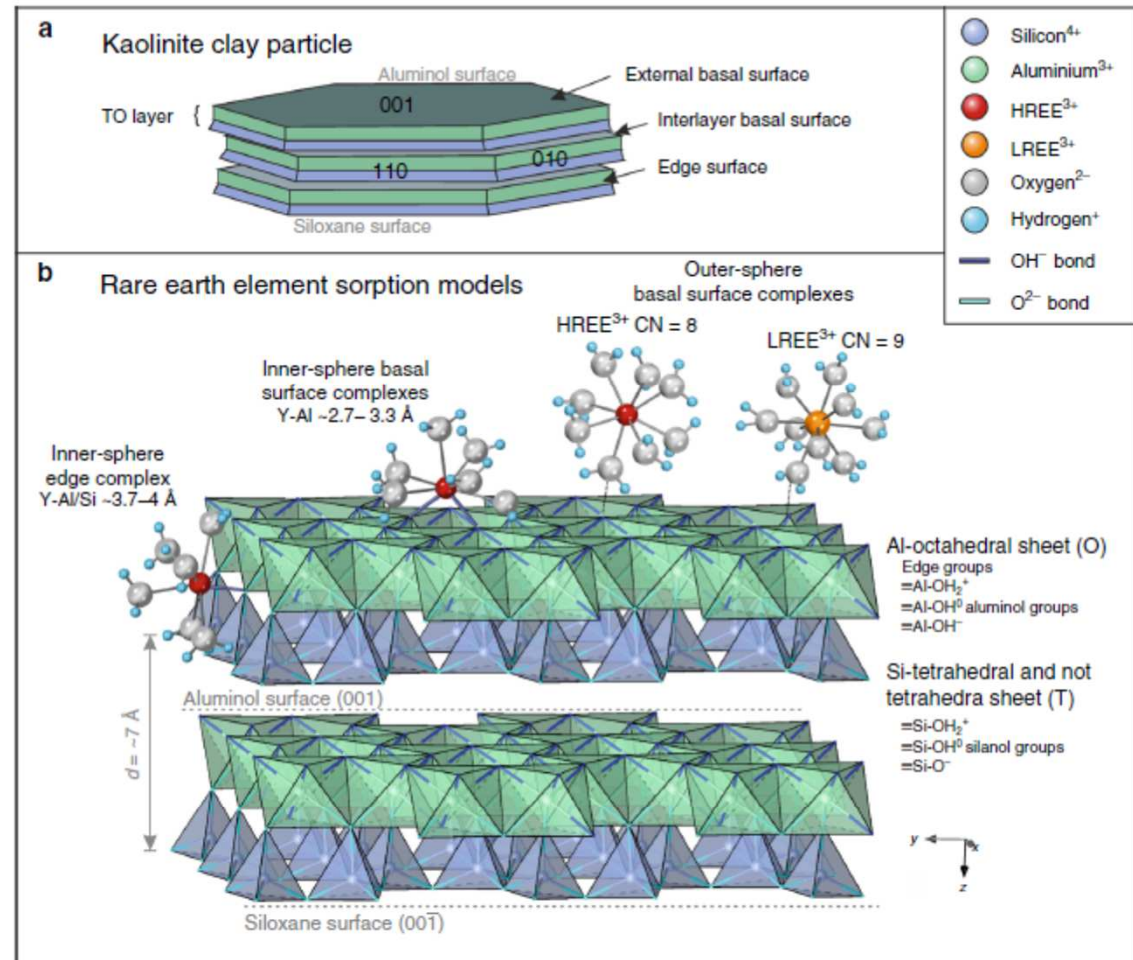


Fig. 8 Schematic adsorption model of rare earth elements onto kaolinite. a) Schematic kaolinite structure showing the 1:1 stacking of Al-octahedral (O) and Si-tetrahedral (T) sheets, forming TO layers with aluminol and siloxane external basal surfaces, edge and interlayer surfaces. b) Rare earth sorption model associated with Al-octahedral (O) sheets of kaolinite. Light and heavy rare earth element (LREE³⁺ and HREE³⁺) complexes may occur as eight- to nine-coordinated inner-sphere (basal surface or edge) complexes via mono- or bidentate bridging oxygens, or loosely adsorbed as 8- or 9-fold hydrated outer-sphere complexes. Our data demonstrate that Y in the studied ion-adsorption ores are dominantly present as 8-fold hydrated outer-sphere basal surface complexes. The data show no evidence for Al or Si scattering within a distance of 4 Å, thereby excluding the inner-sphere adsorption model. A similar sorption model can be made for halloysite (7 and 10 Å), which typically displays a tubular morphology with the aluminol basal surface on the inside of the tubes⁶⁵. CN coordination number.

Depositi secondari delle Terre Rare: Ion-adsorption clays

REO% in Bayan Obo, Mountain Pass and ion adsorption clay deposits (Sources: [Gupta and Krishnamurthy, 2005](#); [Schüler et al., 2011](#); [Shi, 2009](#)).

Ore	Bayan Obo		Mountain Pass		Ion adsorption clays				
REOs	Bastnaesite	Monazite	Basnasite	*Site A	*Site B	*Site C	*Site D	*Site E	*Site F
La ₂ O ₃	27	23.4	33.2	2.1	20	8.5	29.8	27.4	13.1
CeO ₃	50	45.7	49.1	12.8	1.3	1.1	7.2	3.1	1.3
Pr ₆ O ₁₁	5	4.2	4.3	1.1	5.5	1.9	7.4	5.8	4.9
Nd ₂ O ₃	15	15.7	12	5.1	26	7.4	30.2	18.7	13.4
Sm ₂ O ₃	1.1	3.1	0.8	3.2	4.5	2.6	6.3	4.3	4
Eu ₂ O ₃	0.2	0.1	0.1	< 0.3	1.1	0.2	0.5	< 0.3	0.2
Y ₂ O ₃	0.3	3.1	0.1	62.9	25.9	49.9	10.1	26.4	41.7
Gd ₂ O ₃	0.4	2	0.2	5.7	4.5	6.8	4.2	4.4	5.1
Tb ₂ O ₃	Trace	0.1	0.02	1.1	0.6	1.4	0.5	0.7	1.2
Dy ₂ O ₃	Trace	1	0.03	7.5	4.1	8.6	1.8	4	7.1
Ho ₂ O ₃	Trace	0.1	< 0.01	1.6	< 0.3	1.4	0.3	0.5	1.1
Er ₂ O ₃	1	0.5	< 0.01	4.3	2.2	4.2	0.9	2.3	3.1
Tm ₂ O ₃	Trace	0.5	< 0.01	0.6	< 0.3	1.2	0.1	0.3	1.5
Yb ₂ O ₃	Trace	0.5	< 0.01	3.3	1.4	4.1	0.6	2	2
Lu ₂ O ₃	Trace	0.1	< 0.01	0.5	< 0.3	0.7	0.1	< 0.3	0.5

*Sites A to F represent six provinces in southern China.

Depositi secondari delle Terre Rare: Carbone

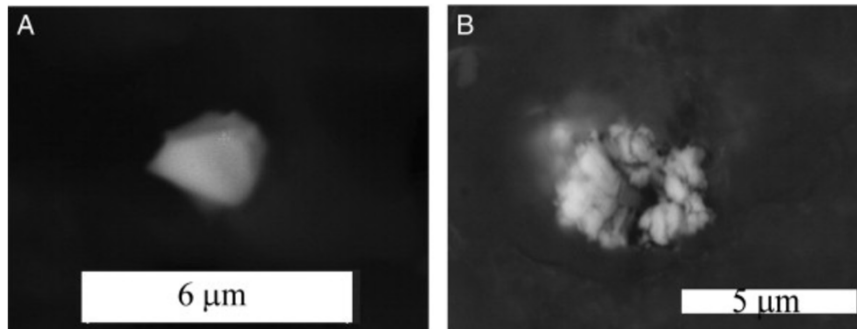
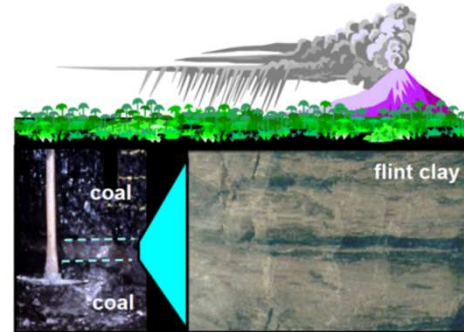
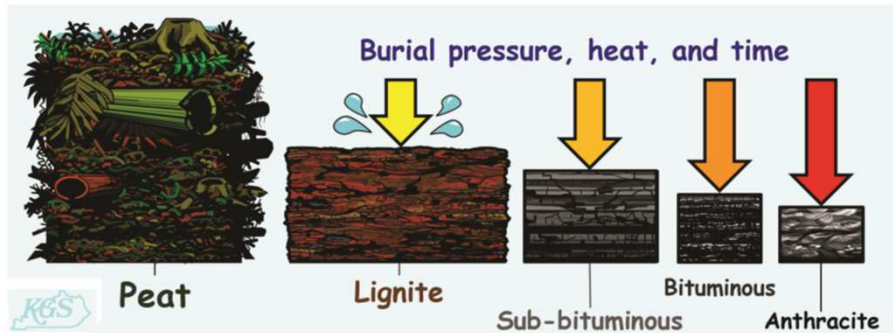


Table 1. Rare-earth-element (REE) contents of fly ash samples investigated, basins where coals yielding the ash originated, and percentages of critical REEs of the total REE contents.

[Samples are derived from U.S. coals except A–C. Results of analyses by various workers are from the compilation by Kolker and others (2017) and references therein. The contents of REEs are in parts per million (ppm)]

Sample	Coal basin	Total REEs (ppm)	Critical REEs* (%)
A	Jungar, Inner Mongolia, China	192.1	28.8
B	Jungar, Inner Mongolia, China	229.7	28.7
C	Jungar, Inner Mongolia, China	293.5	28.3
D	Powder River basin + Appalachian basin mixed	313.8	39.2
E	Powder River basin + Appalachian basin mixed	365.8	37.3
F	Unspecified mixed	523.6	39.7
G	Unspecified mixed	635.2	44.5
H	Central Appalachian basin	524.5	39.5
I	Eastern Interior (Illinois basin)	366.5	39.4
J	Powder River basin	345.2	34.5
K	Central Appalachian basin, Fire Clay coal	1,534.3	34.7
L	Central Appalachian basin, Fire Clay coal	1,667.6	36.5
M	Central Appalachian basin	401.5	38.6
N	Eastern Interior (Illinois basin)	312.1	36.2
O	Central Appalachian basin	563.6	38.1
P	Powder River basin	283.2	32.8
Q	Central Appalachian basin, Fire Clay coal	626.6	36.7
R	Central Appalachian basin, Fire Clay coal	723.4	35.1
S	Central Appalachian basin	1,175.2	38.4

*Critical REEs (listed by increasing atomic number) are yttrium (Y), neodymium (Nd), europium (Eu), terbium (Tb), dysprosium (Dy), and erbium (Er), as defined by Seredin and Dai (2012).

Depositi secondari delle Terre Rare: Drenaggio acido di miniera

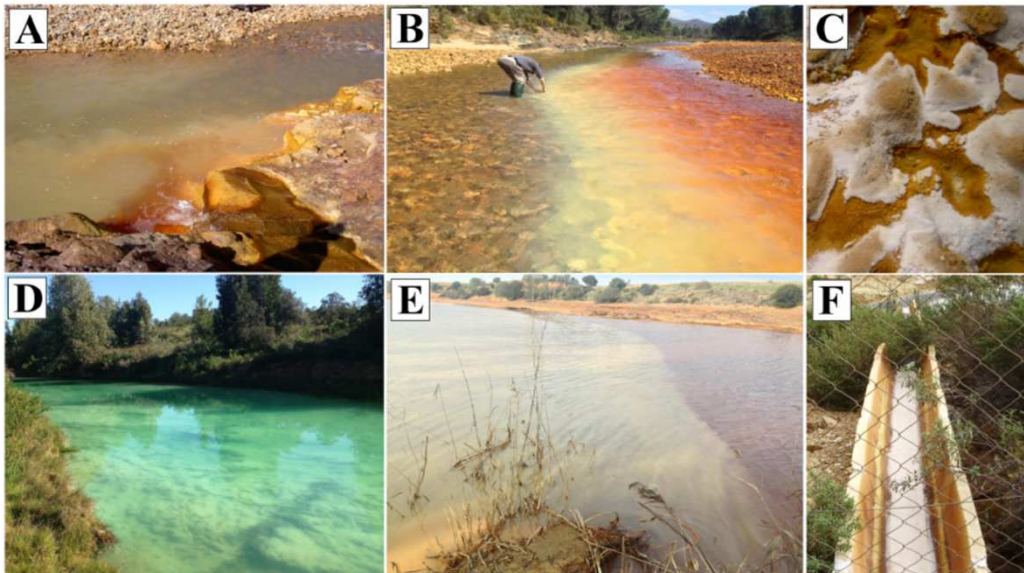
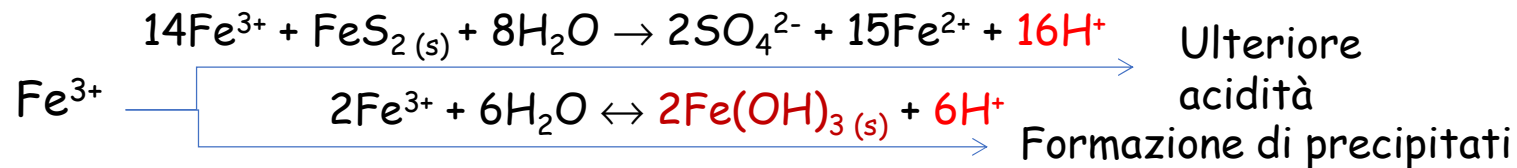
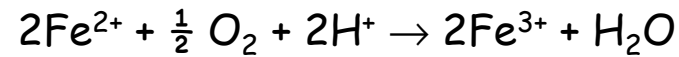
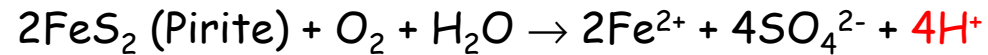
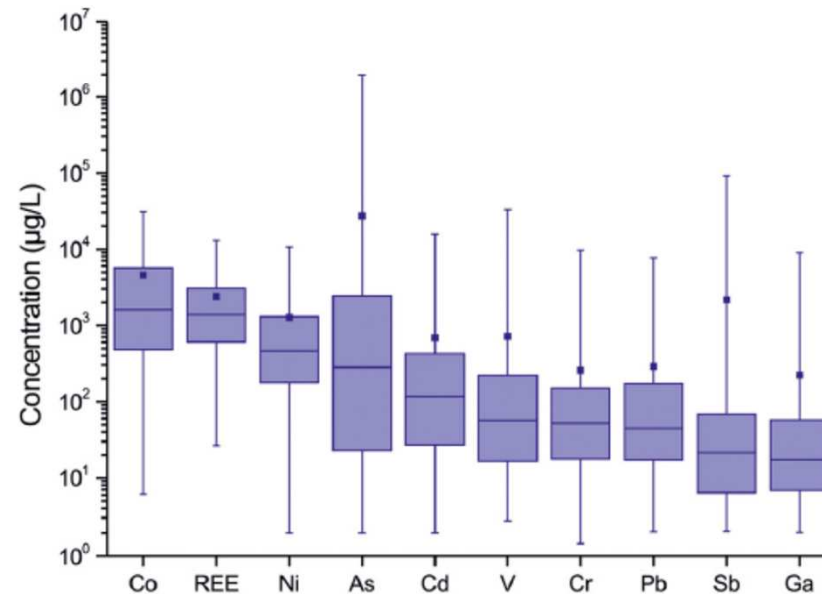


Fig. 2. Pictures of the sampling sites: A) precipitation of ferrihydrite (reddish) and basaluminite (whitish) at the mixing point of the Mina Poderosa acidic discharge and the Odiel river; B) precipitation of schwertmannite (reddish) and basaluminite (whitish) at the mixing point of Agrio acidic discharge (right hand of the picture) and the Odiel river; C) detail of basaluminite precipitates in the Mina Torerera stream; D) basaluminite covering the bed of the Dehesa Boyal stream; E) basaluminite precipitation at the mixing point of a neutral stream (lower left) and the Tinto river (right); F) basaluminite precipitation at bottom of the outflow channel of the Mina Esperanza treatment plant. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Depositi secondari delle Terre Rare: Drenaggio acido di miniera

REE concentration in some AMD.

Location	pH	Σ [REE] ($\mu\text{g/L}$)	Mean Σ [REE] ($\mu\text{g/L}$)
Jaintia Hills coalfield (India)	1.6–4.8		714.7
Iberian Pyrite Belt	1.8–3.4	638–5,167	2,739
Wisniowka mining area (Poland)	2.4–2.6	8,370–24,800	17,916
Discharge to the Odiel River (Iberian Peninsula)	2.4–2.7	2800–4,600	
Inactive Zn–Pb mine of Santa Lucia (Cuba)	2.5–2.6	370–860	
Almagrera mine tailing dam (Iberian Pyrite Belt)	2.6		3,500
Active and passive mines across Illinois (USA)	2.6–4.3	0.69–9,879	1,091
Monte Romero mine (Iberian Pyrite Belt)	2.7		7,900
Xingren coalfield (China)	2.7–4.6	118–926	435
Sitai coal mine and the Malan coal mine (China)	2.99–3.37	72–127	
Former uranium mining site (Germany)	2.9		4,017



Depositi secondari delle Terre Rare: Placers

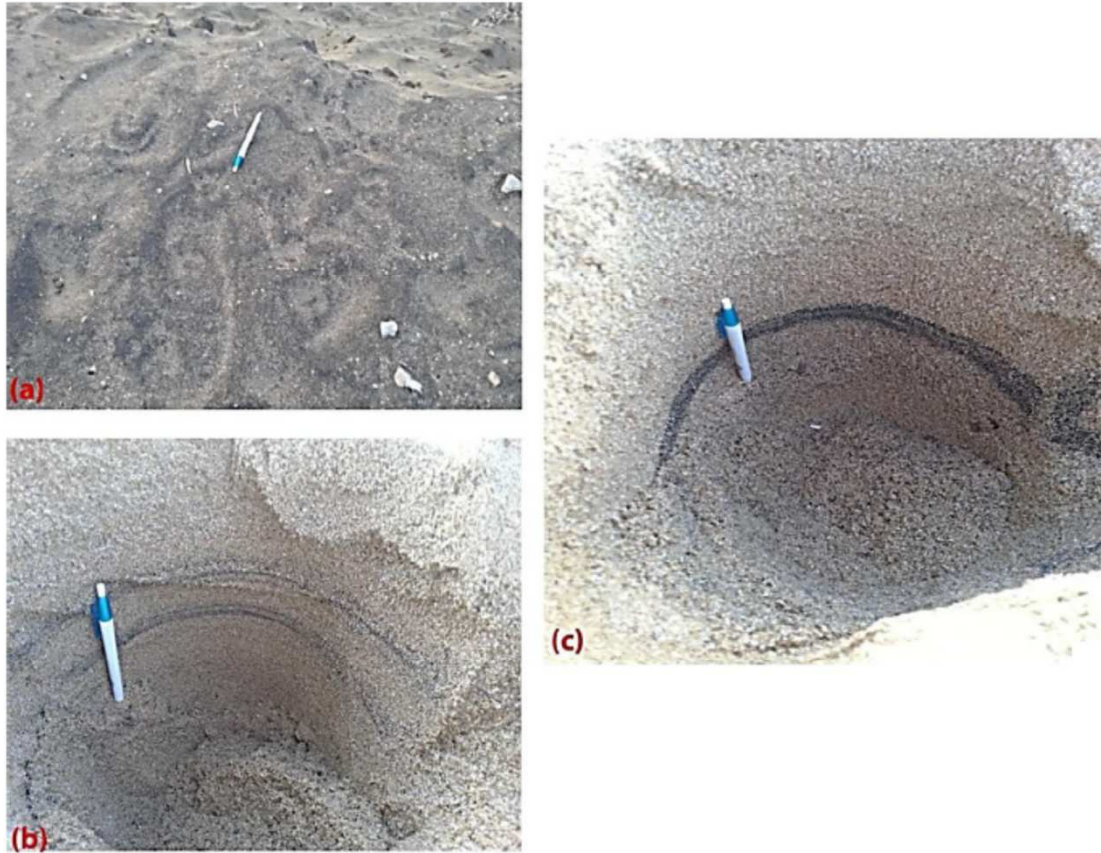
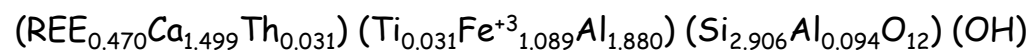


Fig. 2. Sampling locations showing the presence of coastal black sands.



Element	Magnetic fraction (mg/kg)	Non-magnetic fraction (mg/kg)
La	557.8	3522.4
Ce	938.8	6140.6
Pr	93.7	616.9
Nd	287.3	1958.8
Sm	30.4	231.0
Eu	5.2	37.3
Gd	20.5	152.4
Tb	2.2	17.0
Dy	11.0	83.2
Ho	2.0	14.1
Er	6.1	40.3
Tm	1.0	6.0
Yb	7.5	38.3
Lu	1.5	5.8
ΣLREE	1908.0	12469.6
ΣHREE	56.9	394.5
ΣREE	1964.9	12864.1
Y	60.2	421.2
ΣREE + Y	2025.1	13285.3
ΣREE + Y	0.2 wt. %	1.3 wt. %

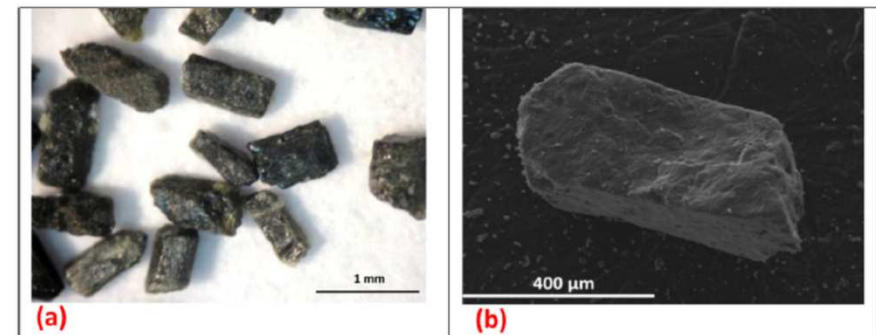


Fig. 5. (a) Allanite crystals observed by binocular microscope (b) backscattered image (BSE) of a single allanite crystal.

Bayan Obo, il più grande deposito di REE al mondo

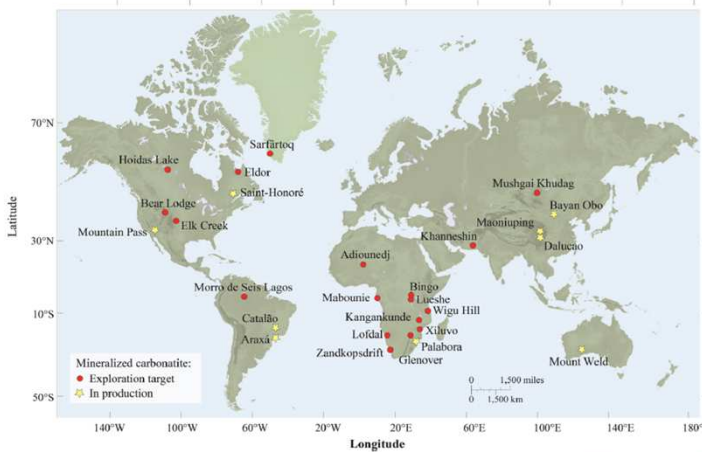


Fig. 1. Global carbonatite distribution including deposit in production and exploration targets (Sources: Eggert et al., 2016; Verplanck et al., 2016).

Scoperto nel 1927. Esistono diverse ipotesi sulla sua genesi:

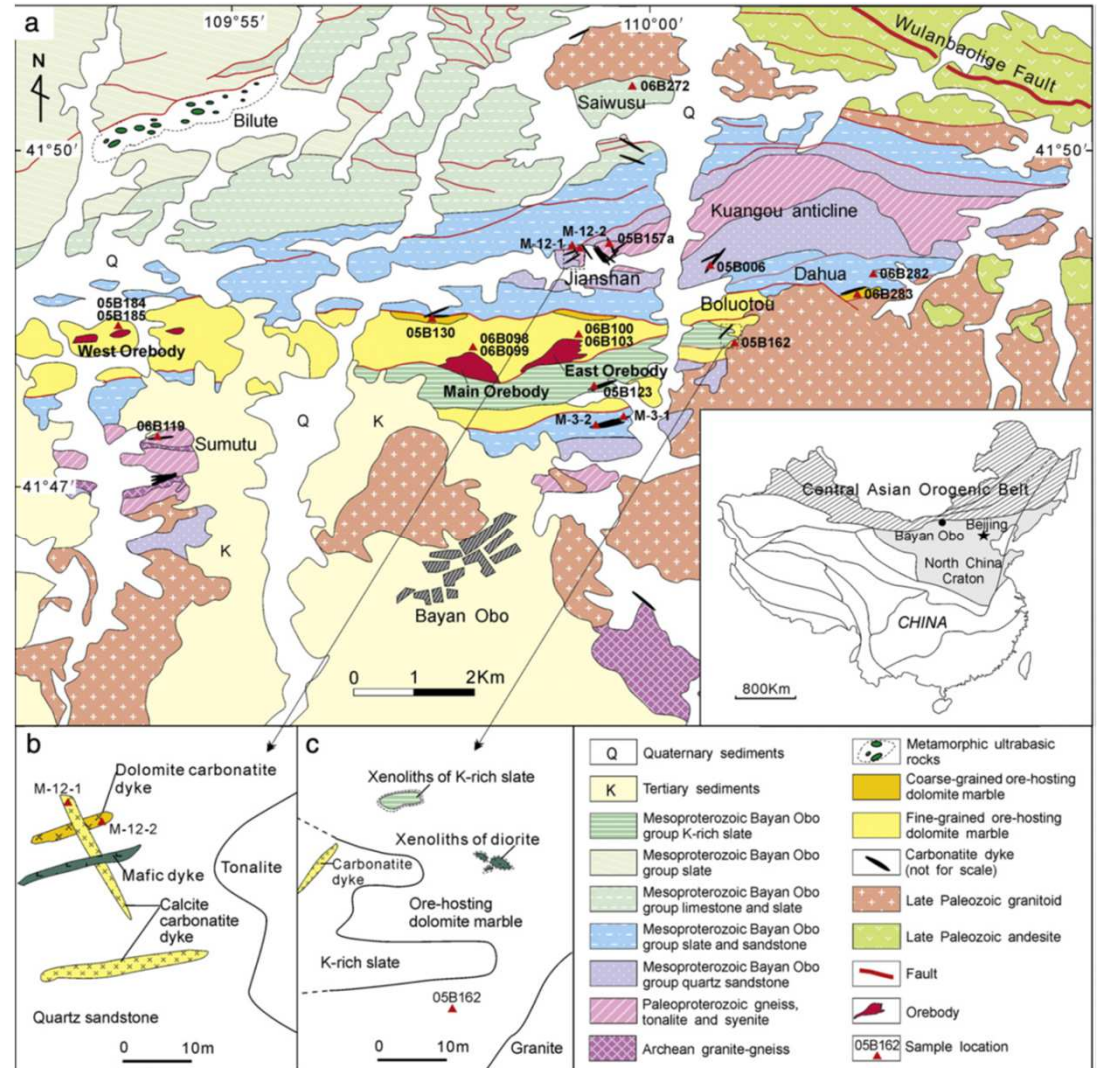
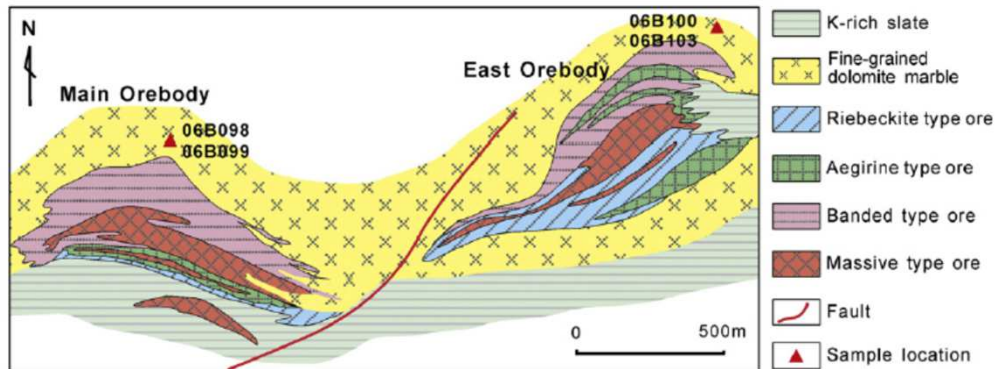
1. Magmatismo carbonatitico
2. Alterazione idrotermale di rocce sedimentarie carbonatiche ad opera di diversi fluidi, incluso uno carbonatitico
3. Eruzioni vulcaniche carbonatitiche su fondale oceanico

Molto probabilmente si tratta di un insieme di eventi (almeno 11) che hanno causato la particolare situazione che si riscontra.

Bayan Obo, il più grande deposito di REE al mondo

Si tratta di un giacimento di Fe e REE in cui viene estratto il Nb come sottoprodotto. I depositi principali sono compresi all'interno di un marmo a composizione dolomitica che fa parte di una sequenza Proterozoica in cui sono comprese anche arenarie e siltiti. Ci sono tre corpi principali e svariati corpi più piccoli. Vengono estratte soprattutto LREE che sono presenti in bastnäsite e monazite. Si trovano anche fluorocarbonati a Ca-REE e Ba-REE.

Gli stadi principali di accrescimento e metamorfismo sono tra i 1370-1200, 430-420 e 343-225 Ma.



Bayan Obo, il più grande deposito di REE al mondo

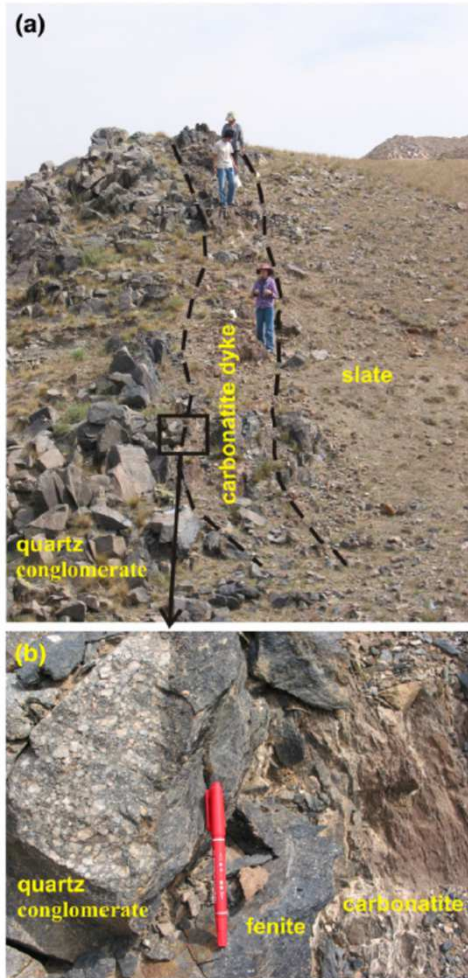


Fig. 5. (A) Carbonatite dyke cutting the Wutai gneiss to the north of Bayan Obo. (B) Intrusive contact at the margin of carbonatite dyke.

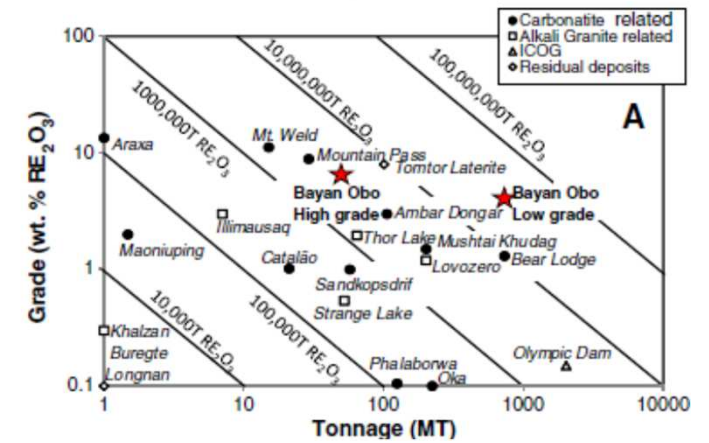


Fig. 3. Outcrop of the studied carbonatite dyke (a) at Bayan Obo, showing strong fenitization developed around the wallrock quartz conglomerate (b).