

Table S1. Representative analyses of minerals in manganese quartzite (sample 23-1F).

mineral	Garnet											
	Grt I id		Grt I od		Grt II id		Grt II od		Grt III id		Grt III od	
SiO <sub>2</sub>	38.57	38.45	37.65	38.18	38.71	38.84	37.52	37.88	38.32	38.77	38.46	37.94
TiO <sub>2</sub>	0.37	0.02	0.00	0.14	0.01	0.11	0.04	0.07	0.03	0.08	0.04	0.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.58	21.71	21.30	21.51	21.85	21.97	21.19	21.42	21.53	21.83	21.76	21.38
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	b.d.	0.02	b.d.	b.d.	0.03	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0.03	0.04
FeO*	1.44	0.87	6.72	8.65	1.18	1.25	7.97	11.85	4.05	5.60	12.45	11.33
MnO	28.41	27.53	25.58	25.23	29.40	29.03	25.69	25.10	25.45	25.97	23.18	23.41
MgO	5.87	6.65	3.16	3.09	6.01	5.87	3.17	1.89	5.88	5.11	2.50	2.42
CaO	4.20	4.40	5.42	4.43	3.78	4.10	4.03	3.68	4.33	4.16	4.47	4.63
Na <sub>2</sub> O	0.05	0.02	0.02	0.01	b.d.	0.08	0.03	b.d.	0.06	b.d.	0.04	b.d.
K <sub>2</sub> O	b.d.	b.d.	0.01	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0.01	b.d.	b.d.	b.d.	0.02
Total	99.77	99.67	100.23	100.34	100.07	99.71	99.65	100.00	99.65	100.02	100.44	99.46
<i>Cations per 12 oxygens</i>												
Si	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Al	1.98	1.99	2.00	1.99	1.99	2.00	2.00	2.00	1.99	1.99	2.00	1.99
Cr	b.d.	0.00	b.d.	b.d.	0.00	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0.00	0.00
Ti	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Fe <sup>2+</sup>	0.09	0.06	0.45	0.57	0.08	0.08	0.53	0.78	0.27	0.36	0.81	0.75
Mn	1.87	1.82	1.72	1.68	1.93	1.90	1.74	1.68	1.69	1.70	1.53	1.57
Mg	0.68	0.77	0.38	0.36	0.69	0.68	0.38	0.22	0.69	0.59	0.29	0.29
Ca	0.35	0.37	0.46	0.37	0.31	0.34	0.34	0.31	0.36	0.35	0.37	0.39
Na	0.01	0.00	0.00	0.00	b.d.	0.01	0.00	b.d.	0.01	b.d.	0.01	b.d.
K	b.d.	b.d.	0.00	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0.00	b.d.	b.d.	b.d.	0.00
Total	8.00	8.01	8.01	7.99	8.00	8.00	8.00	8.00	8.01	8.00	8.01	8.00
X <sub>Fe</sub>	0.12	0.07	0.54	0.61	0.10	0.11	0.58	0.78	0.28	0.38	0.74	0.72
Alm	0.03	0.02	0.15	0.19	0.03	0.03	0.18	0.26	0.09	0.12	0.27	0.25
Prp	0.23	0.26	0.12	0.12	0.23	0.23	0.13	0.07	0.23	0.20	0.10	0.10
Grs	0.12	0.12	0.15	0.13	0.10	0.11	0.12	0.10	0.12	0.12	0.12	0.13
Sps	0.62	0.60	0.57	0.56	0.64	0.63	0.58	0.56	0.56	0.57	0.51	0.52

\*Total Fe as FeO.

b.d., below detection limit; id, inner domain; od, outer domain;  $X_{Fe} = Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)$ ; Alm =  $Fe^{2+}/M$ , Prp =  $Mg/M$ , Grs =  $Ca/M$ , and Sps =  $Mn/M$ , where  $M = (Fe^{2+} + Mg + Ca + Mn)$ .

Table S1. Continued.

mineral	Epidote-group mineral							
	core		inner mantle		outer mantle		rim	
	piemontite	epidote	REE-rich piemontite		REE-rich epidote		epidote	
SiO <sub>2</sub>	37.86	38.09	36.32	36.38	35.67	35.39	38.07	38.00
TiO <sub>2</sub>	0.02	b.d.	0.02	0.02	0.05	0.05	b.d.	0.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.28	22.64	20.09	20.37	20.48	20.14	22.24	22.81
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
FeO*	6.10	9.67	5.97	6.27	7.21	7.58	11.85	10.63
MnO	7.47	5.02	9.17	8.82	5.37	3.53	1.32	1.33
MgO	0.22	0.22	1.31	1.15	1.92	2.10	0.23	0.32
CaO	20.20	19.96	16.61	16.93	15.09	14.69	21.59	21.64
Na <sub>2</sub> O	b.d.	0.02	b.d.	b.d.	0.12	0.40	0.08	0.01
SrO	0.76	0.87	0.36	0.36	0.41	0.23	0.20	b.d.
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.29	0.06	0.97	0.72	1.57	1.56	0.32	0.51
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.42	0.39	5.32	4.35	6.98	8.72	1.47	1.73
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	b.d.	b.d.	0.21	0.15	0.35	0.45	0.05	0.10
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10	0.10	0.81	1.00	1.60	1.64	0.34	0.35
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	b.d.	b.d.	b.d.	0.05	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	b.d.	b.d.	0.09	0.05	b.d.	0.13	0.08	b.d.
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.03	b.d.	b.d.	0.03	b.d.	b.d.	b.d.
UO <sub>2</sub>	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
ThO <sub>2</sub>	0.02	0.03	0.24	0.14	0.36	0.34	0.06	0.12
PbO	0.31	0.26	0.25	0.15	0.14	0.16	0.12	0.10
Total	97.13	97.36	97.75	96.92	97.34	97.14	98.03	97.71
<i>Cations per 12.5 oxygens</i>								
Si	3.01	3.03	3.00	3.00	3.00	3.01	3.03	3.03
Al <sup>VI</sup>	2.18	2.12	1.95	1.98	2.03	2.02	2.09	2.15
Cr	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Ti	0.00	b.d.	0.00	0.00	0.00	0.00	b.d.	0.00
Fe <sup>3+</sup>	0.41	0.64	0.41	0.43	0.51	0.54	0.79	0.71
Mn <sup>3+</sup>	0.50	0.34	0.64	0.62	0.38	0.25	0.09	0.09
Mg	0.03	0.03	0.16	0.14	0.24	0.27	0.03	0.04
Ca	1.72	1.70	1.47	1.50	1.36	1.34	1.84	1.85
Na	b.d.	0.00	b.d.	b.d.	0.02	0.07	0.01	0.00
Sr	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	b.d.
La	0.01	0.00	0.03	0.02	0.05	0.05	0.01	0.02
Ce	0.01	0.01	0.16	0.13	0.22	0.27	0.04	0.05
Pr	b.d.	b.d.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Nd	0.00	0.00	0.02	0.03	0.05	0.05	0.01	0.01
Sm	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Gd	b.d.	b.d.	0.00	0.00	b.d.	0.00	0.00	b.d.
Y	0.00	0.00	b.d.	b.d.	0.00	b.d.	b.d.	b.d.
U	b.d.	b.d.	b.d.	0.00	b.d.	b.d.	b.d.	0.00
Th	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
Pb	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	7.93	7.92	7.88	7.88	7.88	7.91	7.96	7.95
REY	0.03	0.02	0.22	0.19	0.32	0.39	0.07	0.08
Czo	0.17	0.11	0.00	0.00	0.03	0.02	0.09	0.15
Ep	0.37	0.58	0.39	0.41	0.55	0.66	0.82	0.75
Pmt	0.46	0.31	0.61	0.59	0.42	0.31	0.09	0.10

\*Total Fe as FeO.

b.d., below detection limit; Czo = (Al<sup>VI</sup> - 2)/M, Ep = Fe<sup>3+</sup>/M, Pmt = Mn<sup>3+</sup>/M, where M = (Fe<sup>3+</sup> + Mn<sup>3+</sup> + Al<sup>VI</sup> - 2).

Table S1. Continued.

Table S1. Continued.

mineral	Phengite		Tephroite	Chlorite		Plagioclase	K-feldspar	Titanohematite		Ilmenite	Pyrophanite			
	inner	outer												
SiO <sub>2</sub>	49.48	48.04	47.80	29.12	28.57	27.00	67.10	64.13	SiO <sub>2</sub>	0.06	0.07	0.06	0.04	0.09
TiO <sub>2</sub>	0.47	0.86	0.28	0.21	b.d.	0.12	b.d.	0.02	TiO <sub>2</sub>	7.41	6.12	44.00	48.19	37.73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.14	29.13	28.10	b.d.	20.04	21.10	20.73	18.61	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.15	0.05	0.10	0.06	0.04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.04	b.d.	b.d.	0.03	b.d.	b.d.	b.d.	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	b.d.	b.d.	b.d.	0.01	0.01
FeO*	3.96	3.48	4.78	1.10	10.50	14.32	0.06	0.01	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> **	85.35	88.40	13.91	6.73	26.16
MnO	0.01	0.07	0.22	65.52	2.37	1.68	0.03	b.d.	FeO**	6.33	5.50	39.34	2.60	5.46
MgO	2.99	2.52	2.39	0.40	23.38	21.22	0.01	b.d.	MnO	0.51	0.18	0.27	40.20	28.20
CaO	0.03	0.01	0.01	2.03	0.04	0.02	0.96	0.00	MgO	0.03	b.d.	0.01	0.04	0.01
Na <sub>2</sub> O	0.65	0.59	0.15	b.d.	0.03	0.02	11.04	0.20	CaO	b.d.	b.d.	0.02	0.01	b.d.
K <sub>2</sub> O	10.42	10.55	11.15	b.d.	0.01	0.01	0.06	16.99	Na <sub>2</sub> O	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Total	95.15	95.30	94.88	98.38	84.97	85.49	100.00	100.04	K <sub>2</sub> O	b.d.	b.d.	b.d.	0.02	0.01
									Total**	99.84	100.27	97.72	97.91	97.72
Cations per 11, 4, 14, 8, and 3 oxygens for phengite, tephroite, chlorite, feldspar, and titanohematite-ilmenite-pyrophanite, respectively.														
Si	3.34	3.24	3.27	0.99	2.89	2.77	2.94	2.98	Si	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al <sup>IV</sup>	0.66	0.76	0.73	b.d.	1.11	1.23	0.06	0.02	Ti	0.15	0.12	0.86	0.93	0.74
Al <sup>VI</sup>	1.51	1.56	1.54	b.d.	1.28	1.32	1.01	1.00	Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr	0.00	0.00	b.d.	b.d.	0.00	b.d.	b.d.	b.d.	Cr	b.d.	b.d.	b.d.	0.00	0.00
Ti	0.02	0.04	0.01	0.01	b.d.	0.01	b.d.	0.00	Fe <sup>3+</sup>	1.70	1.75	0.27	0.13	0.51
Fe <sup>2+</sup>	0.22	0.20	0.27	0.03	0.89	1.23	0.00	0.00	Fe <sup>2+</sup>	0.14	0.12	0.86	0.05	0.12
Mn	0.00	0.00	0.01	1.89	0.20	0.15	0.00	b.d.	Mn	0.01	0.00	0.01	0.88	0.62
Mg	0.30	0.25	0.24	0.02	3.53	3.24	0.00	b.d.	Mg	0.00	b.d.	0.00	0.00	0.00
Ca	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.04	0.00	Ca	b.d.	b.d.	0.00	0.00	b.d.
Na	0.09	0.08	0.02	b.d.	0.01	0.00	0.94	0.02	Na	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
K	0.90	0.91	0.97	b.d.	0.00	0.00	0.00	1.00	K	b.d.	b.d.	b.d.	0.00	0.00
Total	7.04	7.05	7.08	3.01	9.92	9.95	5.00	5.03	Total	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
X <sub>Fe</sub>	0.43	0.44	0.53	0.61	0.20	0.27	-	-	Pph	0.01	0.00	0.01	0.88	0.62
An	-	-	-	0.94***	-	-	0.05	0.00	Ilm	0.14	0.12	0.86	0.05	0.12
Ab	-	-	-	-	-	-	0.95	0.02	Hem	0.85	0.88	0.13	0.07	0.26
Or	-	-	-	-	-	-	0.00	0.98						

\*Total Fe as FeO.

\*\*Recalculated after Droop et al. (1987).

\*\*\*Tep = Mn/(Fe + Mg + Ca + Mn) for tephroite.

b.d., below detection limit; X<sub>Fe</sub> = Fe<sup>2+</sup>/(Fe<sup>2+</sup> + Mg); An = Ca/M, Ab = Na/M, and Or = K/M, where M = Ca + Na + K; Pph = Mn, Ilm = Fe<sup>2+</sup>, and Hem = 1 - Pph - Ilm.