Geol. Mag. **154** (3), 2017, pp. 419–440. © Cambridge University Press 2016

10.101 / 0016 56 16000042

10003

210016,

, 36 4 -5305,

(*Received* 1 2015 *accepted* 2016 *first published online* 1 2016)

Ab ac

~4 5

~400

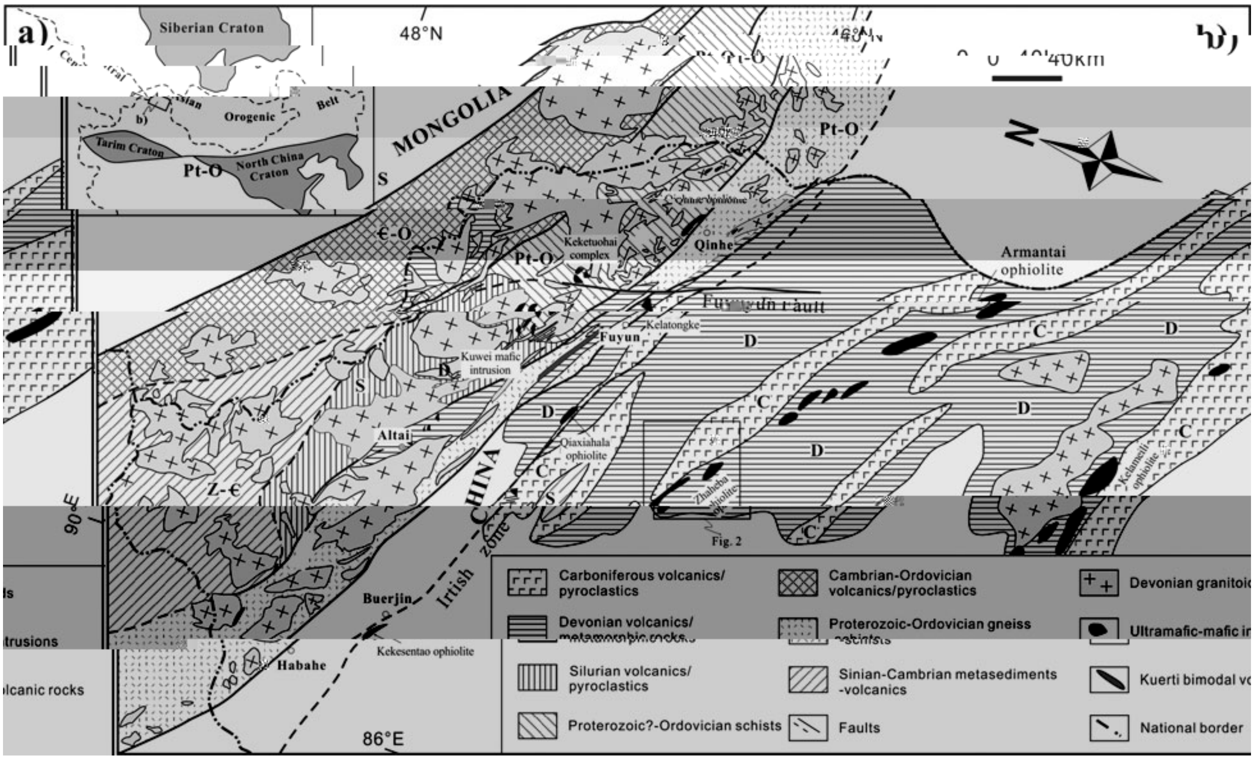
ε (*t*) (13 20) δ[1] (+5.3 ‰)

1. I c

(e. *et al.* 200 & , 200 *et al.* 2012 *et al.* 2012, 2013 *et al.* 2013), *et al.* 200 *et al.* 200 a). *et al.* 2000 & , 2003 *et al.* 200 , 2014). & (2011) (2014)

et al. 2002 *et al.* 2004, 200 a) (. 1a). (*et al.* 200 a,b & , 2012). , 1 3 *et al.* 2003 *et al.* 2003 *et al.* 200 a) (. 1).

† 1 6



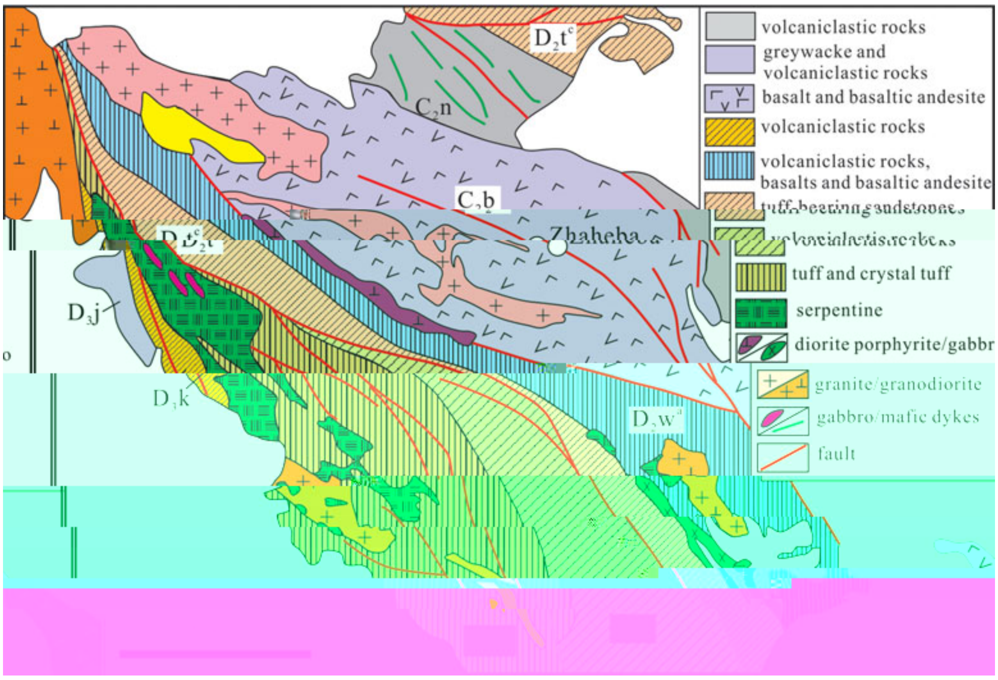
e 1. (a) e a e a a e e a a e e ( ) ( ) e e a e e a a e e e ea e a a a e e e ea e a a a e e e (e a e a et al. 200).

a e a e e a e . , e e e a e e - e a , e a , a e a e e e a e a e e e a e a e a e (1) e e e a e a e a e e e (2) e e e a e e- e a e a e.

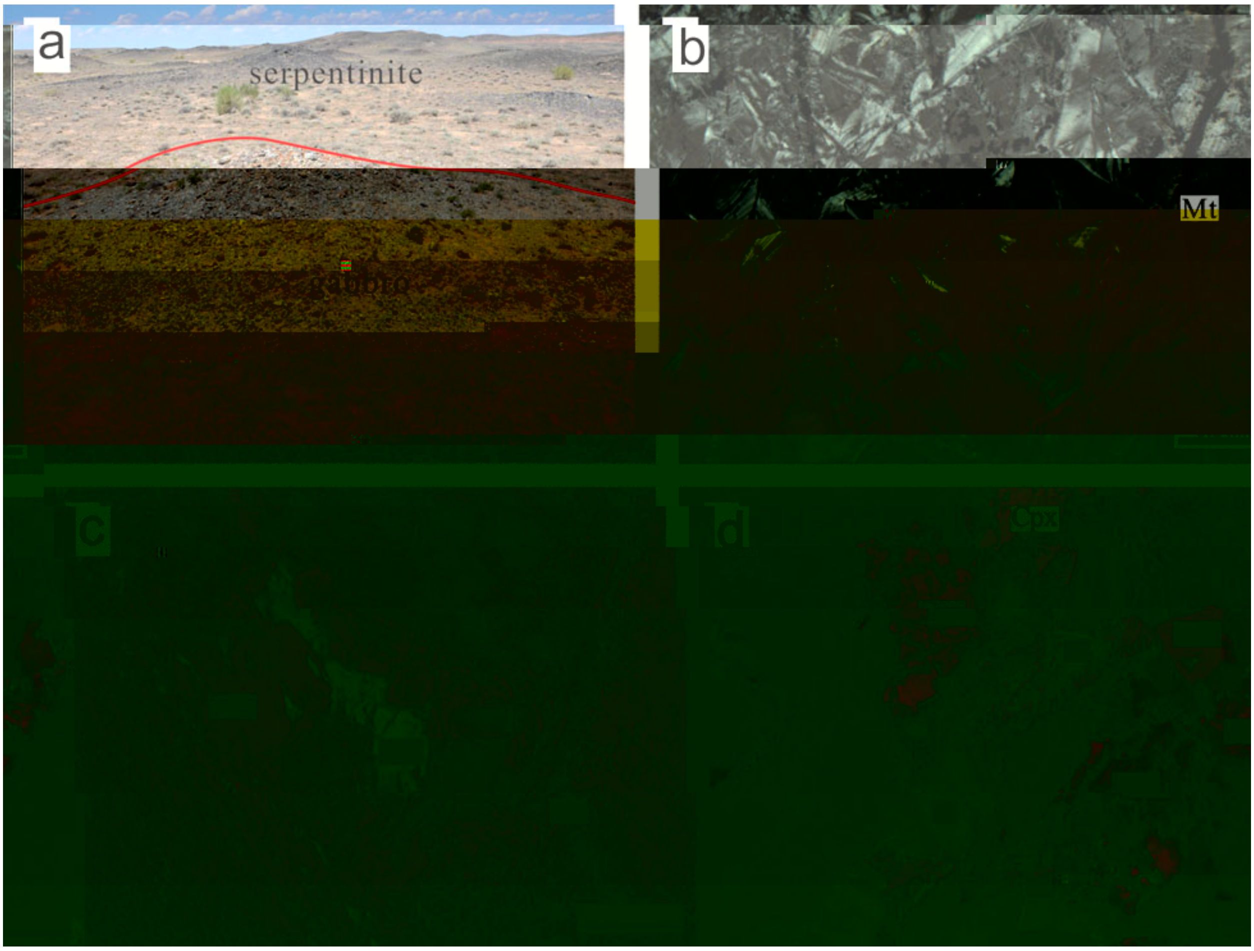
e e > 0% e e e, a e e a e (. 3 ,). a e e e e a e e e e e a e - e e a e a e (e. . a et al. 2013). e e e e a - e e - e . e a a e a a e (40 0%) a e e (30 50%) a e a e e (5 10%) a a a e (. 3). e e a e e e a . e e a e a a e e a a e e a e a e a e a e a e a a - e a , e e e e a a a e a e e a e e e - e a - e . e a a a e a e - e a e e e a a e e e e a a e e a ( ) a e a a a ( ) a e e e a a e a a ( ) (a et al. 2006). e ea e e a e e e a e a e a a e e a a a a. e a e ee e e a a e , e a a , a a a - ea a e (. 2). e e e e, a a a a e e a e a a a e a a a e e , a e a - a ea e a ea . a a a e a a e a ee e e a a e e e a e a e e a e e e a a ea- (a , 1 3). e e a

2. R a , b a a

e a e a e e e e e e - e e e e a e a a a e e , e a e e a e e e a e (1 , 2). e a e e e e, a e, a a a e a a a a a a e. e a e e a a e a a , a a a e e e e a e e a e e . e a e e e e e a a ee e e (. 3a). e e a e - e a ea 15 a e a e . e e - e e e e a - a e e e e e e e a a a a e e e a e e e (. 2, ee e). a a a a e 1 5 e a e a 1 a e ee e e e e. e e a a e ee a e e e e e. e e e -



e 2. (e) e a a e a e a e e (e a e *et al.* 200 , 200 *a a* a , 1 3).



e 3. (e) e a a a e e e e e a e a e. (a) ... > 0% ...

a a e a e e a a a a e -
e e a e e e . e.

3. A a ca c

3.a. Z c U Pb a a H O a a

e e e a a e a a a e
(2013 01, 46° 32′ 51 , ° 2′ 4) a a
a e (2013 02, 46° 33′ 2 , ° 2′ 36) e -
e e a e e e e e e .
e a a a a e e a
a e a e e e . a e e
e a - e e a a e.
a a e e e e a a e e e
e , e e e e
e a a a . e e e e
a e a e e e a a e
a a e e e ( ) a e e ea e
e a e . a e a e -
e e a a e e a e a a -
e e a a a e e (- -)
e a e a e e a e a
e e , e e e a e . e e a e
a a a e e a e ee e e e
et al. (2011). e e e a a e e a e
a e e a a e . a a e
a e e - e - a a a (*et al.*
2010) a (, 2003). e e e ea
a e a e e a e 5% e e e e .
a e a a a e a e e
e e e a a e a a e 1 a e
e e a a e a a e 2, e e e , a a -
a e a . // a . a e. / e .
e e e e ea e e
a e a 12 0 a e e e a
e , e e a e e e e ,
a a a e e a e e e
et al. (2010*a*). ea e ¹ /¹⁶ a e e
a e e a a a ea ea
a e (, ¹ /¹⁶ = 0.0020052),
a e e e e e a a a -
a a ( ) e a a a e e -
e e a a a δ¹ a e 5.31 ‰ (*et al.*
2010*b*). e ea e e e a -
a e e e a e e
ea δ¹ 5.44 ± 0.21 ‰ (2), -
e e e e e a e 5.4 ± 0.2 ‰
(*et al.* 2013). e a a a e e
e e e a a e a a e 3 a a a ea
. // . a . a e. / e .

3.b. M a a a

e a e e e e e e
- e a a a e 00 e e -
e e e e a e e
e e e a e a e e e -
, e e a e e e . e a -
e e 15 e a e e a a e a 15
ea e 20 e. e e e -
a e e a a a a a e e e -
e e a a e a a e 4 a 5 a a a e a
. // . a . a e. / e .

3.c. W - c a a

e- a - a a e-e e e
e e a a e a e a e e e -
, e e a e e e . a e e e
e e a a e a a 100e -
e a a a e e e e *et al.*
(2004). a a e e e a e e a
2%. a e e e e e e a a e a e -
e e 6000 - e -
e e e *et al.* (2004). 50
a e e ea a e e e e
- e e e a + ₃ -
e. e a a a a e
e e e a e a
. e a a -1, -2 a -2,
a e e e a a a a -1 a -
3, e e e a a e e e e a
ea e a e . - a a a e
e e e a e e a 3 5%. e a a a e
a e e a e 1.
a e ea e e e e
e a e e + ₃
a , a e e a a e e a a -
e a e e e . e ea e e e e
e e a a e - e
e e a a a e e e (-
-) a e a e e a a e e-
e e , e e e , e e
a e e e . e e a e e e a e e
e e *et al.* (2004). e ea e / ⁶
a ¹⁴³ /¹⁴⁴ a a e e e ⁶ / =
0.11 4 a ¹⁴⁶ /¹⁴⁴ = 0. 21 , e e e . e
ea e / ⁶ a e a e a e e 0. 102
e a a a 0. 0506 -1, a
e ¹⁴³ /¹⁴⁴ a e a e a e e 0.512104 -
1 a 0.5126 1 -1. e a a a e a
a a e a a e e a e e a e 2.

4. A a ca

4.a. Z c U Pb a

e a a e a e a e a
e . a a e a e
a 100 150 μ a a e a a
1.1 2 1. a e , e a
e a , ea e a a e -
a a a (ee e . 4a).
a a e e e e a e, a
e e a a e (22 123) a (
5) e / a a 0.4
0. . e - e e a a e 30 e e
e e a a a e a a -
a e a a e e ea a e 4 5. ± 2.5 a

a e 1. e e a e e e e, . . a e a a a e a e a e e

a e e	2013 01-1	2013 01-3	20132 01-4	2013 01-5	2013 01-6	2013 01-	2013 01-	2013 01 1	2013 01 2	2013 01 4
Major elements (%)										
2	3 . 0	4 .20	3 .41	3 .62	3 .22	3 . 2	3 .05	4 .22	46.4	51.2
2	0.05	0.20	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.14	0.12	0.2
2 3	0.61	1. 6	1.04	0.6	0. 0	0. 4	0. 0	1 .2	1 .64	1 .33
e 2 3	.44	4.6	.	.36	.5	.16	. 4	3.6	3.24	3.
	0.0	0.10	0.11	0.11	0.11	0.0	0.11	0.0	0.0	0.0
	3 .21	24.5	3 . 2	3 .	3 .0	3 .31	3 .44	10.04	.03	5.
a	0.12	15.42	0.15	0.14	0.2	0.10	0.14( )-5 31(.0)	10 5. - .1431 -( )	0 5.4 5 3.53	4.1(.12) a42.5 5 4

13:2.1(.1. (3 .21)-5530. 1) 4-5 1 425 .6 2 --6030

a e 1. e

a e e	2013 01-1	2013 01-3	20132 01-4	2013 01-5	2013 01-6	2013 01-	2013 01-	2013 01 1	2013 01 2	2013 01 4
	0.005	0.064	0.00	0.005	0.00	0.003	0.003	0.051	0.044	0.222
	0.021	0.34	0.044	0.042	0.0 2	0.031	0.033	0.310	0.25	1.450
	0.004	0.04	0.00	0.00	0.011	0.005	0.005	0.04	0.043	0.21
	0.011	0.232	0.036	0.044	0.012	0.034	0.00	0.123	0.0 0	0. 3
a	0.0 0	0.036	0.03	0.03	0.06	0.026	0.025	0.046	0.031	0.06
	0.26	1. 10	6.600	1. 0	0. 3	0.233	1.150	1.5 0	0.516	0.1 5
	0.406	0.0 2	0.12	0.112	0.0	0.1	0.054	0.16	0.1 1	0.6 5
	0.046	0.034	0.014	0.02	0.050	0.030	0.010	0.050	0.02	0.130
	0.1 1	0.144	0.203	0.364	0.042	0.0 4	0.0	0.066	0.042	0.0 3
a e e	2013 01 5	2013 01 6	2013 01 (1)	2013 01 (1)	2013 01 (1)	2013 03 2 (1)	2013 03 3 (1)	2013 03 4 (1)	2013 03 5 (1)	2013 01 3 (2)
					Major elements (%)					
2	4 .1	45.	4 .	53.1	51. 1	50.40	50.54	50.52	51.22	52.3
2	0.34	0.15	1.40	1.24	1.31	1. 0	1.63	1.31	1.1	0.33
2 3	1 .	1 .5	16.5	16.1	15. 3	15.	16. 6	15.55	15.4	1 .61
e2 3	4.52	3.34	.	.11	.43	.0	.50	.42	. 2	3.44
	0.0	0.0	0.11	0.10	0.11	0.13	0.11	0.14	0.12	0.0
	6.	.42	4. 0	4.2	4.41	5.	3.2	6.06	.14	4.
a	11.03	12.61	6.22	5. 5	6.3	6. 5	4.52	.4	.26	. 0
a2	4. 6	.3	. 2	.3	.00	4.52	.31	4. 0	4.0	.11
2	0.13	0.11	0.3	0.31	0.42	2.04	0.33	1.2	2.03	0.1
2 5	0.04	0.02	0.62	0.62	0.65	0. 4	0.6	0.4	0.44	0.04
	3. 2	3.26	4.24	2.54	2. 3	2.2	5.14	2.65	1. 3	2.
	. 5	. 2	. 6	. 0	.4	.40	. 1	.6	.6	. 1
	4.	.4	.11	. 0	.42	6.56	.64	6.0	6.11	.2
#	5	1	55	54	54	56	41	56	64	4
					Trace elements (ppm)					
	.0	4. 5	1.16	1.12	1.4	.0	40.4	5.2	6. 2	5. 1
e	0.22	0.135	1.2 4	1.6 3	1.316	1. 53	1.034	1.100	0.5 5	0.62
	25.0	23.	1 .6	1 .5	1 .5	.5	1 .2	25.2	1 .	1 .0
	11	3.	1 6	166	1 2	22	22	254	1	5.
	34.	163	60.5	62.6	64.1	116	1 .	0.	203	23.
	24.2	21.6	26.	23.6	24.6	2 .	2 .5	2 .0	2 .0	16.4
	4.	1 5	63.6	50.	51.4	6.	2 .	5 .3	132	1.1
	52. 4	55.5	(1.32. (132)-6300 -1.04.3(510.5)-1 5)-6361 5 0. (6.2(254)-6435.122((1.32- .46 2 0 30 . 5 6.26622)-6240. .46215.55)-56 4 (3.24)-56 4. 5)-36 2 .5101.							

4..05 6 1. 6 .6

a e 1. e

a e e	2013 01 5	2013 01 6	2013 01 (1)	2013 01 (1)	2013 01 (1)	2013 03 2 (1)	2013 03 3 (1)	2013 03 4 (1)	2013 03 5 (1)	2013 01 3 (2)
a	3.	1.20	3 .60	46. 0	4 .30	23.40	43.00	25.20	32. 0	6.56
e	.	2.6	.50	.1(15 2..6(. 0)-5 46.414 .30)-5 4 . 3 . 0						

a -5046.001. 0

a e 1. e

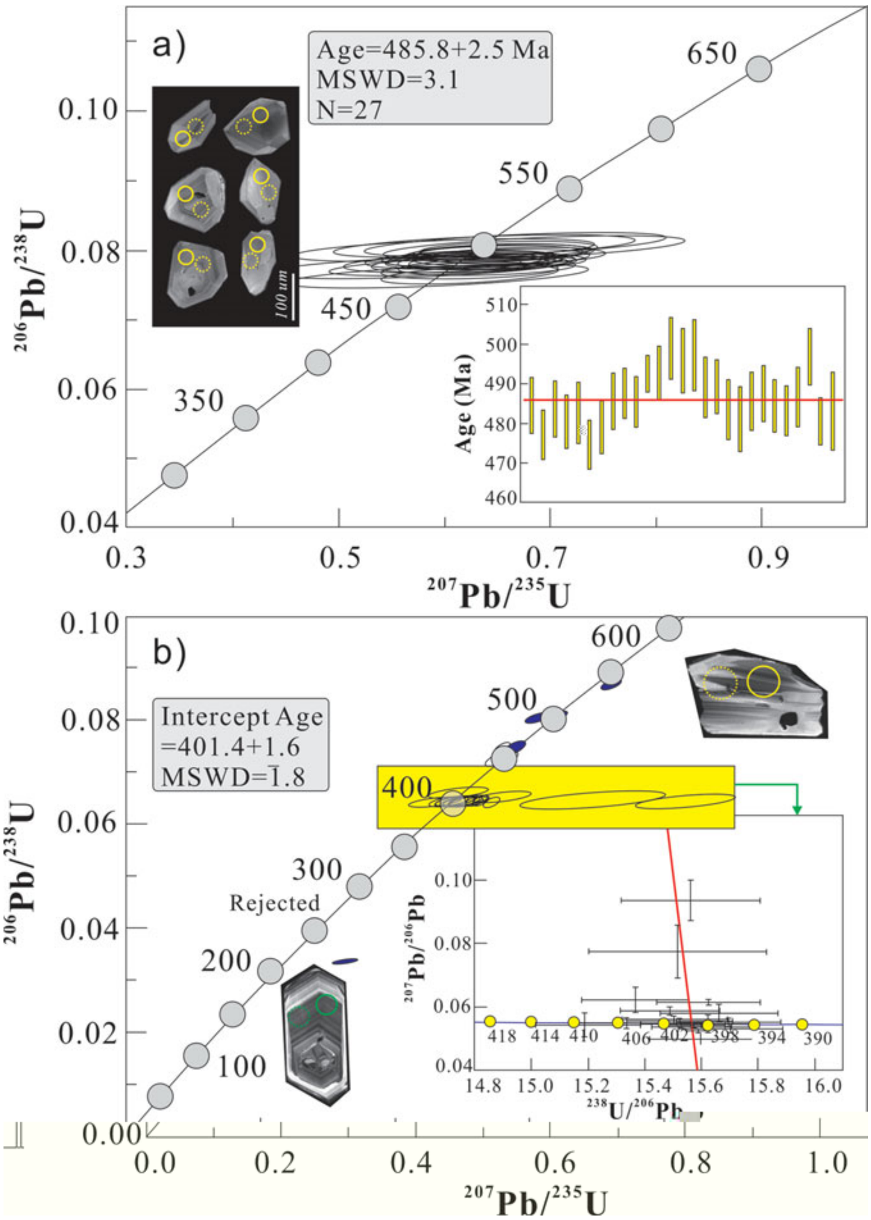
a e e	2013 01 11 (2)	2013 02 1 (2)	2013 02 2 (2)	2013 03 1 (1)	2013 03 6 (1)	2013 01 10 (2)	04 06 (1)	04 24 (1)	04 2 (1)	03 1 (1)
				Trace elements (ppm)						
	1 .4	36.	42.4	26.0	32.4	1 .	/	/	/	/
e	0.3 5	0.153	0.35	1.1	0. 4	0.46	/	/	/	/
	32.5	33.2	34.5	25.1	26.3	32.1	13.4	20.5	1 .	20.3
	1 4	203	21	33	341	1 5	144	1 4	214	265
	56.5	44.2	4 .	1 .	22.2	53.	15	162	214	265
	34.	3 .5	3 .3	23.1	24.	33.	20.6	30.	2 .	20.2
	66.4	4.6	6.4	25.4	2 .1	66.6	.1	114	5.5	.02
	6.4	236.4	256.	205.4	20 .	114.20	/	/	/	/
	4 .0	44.1	4 .0	4.	103	44.1	/	/	/	/
a	12.0	11.1	11.2	14.	13.6	12.0	/	/	/	/
	0.5	1.420	1.0 0	3.130	3.2 0	0.5 3	4.	1 .1	22.0	1 .2
	1	1 50	5	2 0	24	6 6	1	31	111	6
	13.0	13.0	13.2	21.1	22.	12.5	13.2	13.2	14.	20.1
	54.	42.3	41.5	144	154	52.	243	133	164	151
	1.2	0. 4	0. 55	11.315	11. 5	1.25	20.2	12.	21.	12.2
	0.025	0.030	0.02	0.051	0.052	0.02	/	/	/	/
	0.3 1	0.2 6	0.32	1.560	1.450	0.360	/	/	/	/
	0.2	1. 20	1.030	0.365	0.406	0.336	/	/	/	/
a	11	3 2	346	25	50	4.3	/	/	/	/
a	10. 0	. 40	.610	26.40	26. 0	10.50	30.6	32.2	40.1	26.4
e	23.00	1 . 0	1 .40	51.50	54. 0	22.30	5 .	62.	2.3	52.5
	2. 0	2.520	2.510	5. 50	6.1 0	2.6 0	6.	. 4	10.5	6.4
	11. 0	11. 0	11.60	22.30	24.30	11.60	2 .5	31.2	43.1	24.4
	2.540	2. 00	2.6 0	4.4 0	4. 00	2.3 0	4.5	5.2	6.	4. 5
	0. 6	0. 1	0. 0	1.163	1.25	0. 3	1.45	1.5	2.0	1.03
	2.4 0	2. 13	2. 54	4.14	4.46	2.522	3.56	4.01	5.35	4.23
	0.3 6	0.3	0.3	0.612	0.660	0.3 4	0.4	0.54	0.64	0.63
	2.1 0	2.150	2.220	3.420	3.6 0	2.130	2.5	2.	3.24	3. 5
	0.46	0.446	0.444	0. 2	0. 5	0.46	0.4	0.52	0.5	0.
	1.350	1.230	1.240	2.120	2.2 0	1.310	1.32	1.3	1.45	2.25
	0.1 0	0.16	0.1 5	0.304	0.32	0.1 4	0.1	0.2	0.2	0.34
	1.210	1.050	1.120	1. 60	2.110	1.210	1.25	1.23	1.24	2.13
	0.1 4	0.164	0.165	0.2 1	0.323	0.1 3	0.20	0.1	0.1	0.34
	1.3 0	0. 41	1.040	3.2 0	3.510	1.460	5.3	3.2	4.16	3. 2
a	0.0 4	0.062	0.051	0.5	0.644	0.0	1.35	0.6	1.16	0.6
	0.151	2.0	1.50	2. 5	1.	0.33	/	/	/	/
	0.3 4	0.206	0.200	45.20	35.10	0.41	.13	.0	4.1	21.06
	1. 0	0. 61	0. 1	. 60	.2 0	1. 0	4.50	2.63	3.20	.41
	0.500	0.304	0.302	2. 30	3.4 0	0.501	1.	0.6	1.46	2.5

e e e e a a a a a a e e / e ee .
a a a e 04 06, 04 26, 04 2 a 04 1 a e *et al.* (200 *a*).

a e 2. e a a e a e a a ea

a e			e ( )	( )	/ 6	/ 6 (1σ)	(/ 6)	( )	( )	14 / 144	143 / 144 (1σ)	(143 / 144)	ε (*t*)
2013	01 3	a a (2)	0.36	3 2	0.002	0. 04030(2)	0. 04015	2.4	10.	0.13 4	0.512 3 (40)	0.5124 4	6.
2013	01 10	a a (2)	0.5	6 6	0.0024	0. 04 5 (23)	0. 04 45	2.3	11.6	0.1235	0.512 0 (43)	0.5124 6	.1
2013	03 1	a a (1)	3.13	2 0	0.0335	0. 06324(20)	0. 06133	4.4	22.3	0.121	0.512533(4)	0.512214	1.
2013	03 2	a a (1)	2.	1320	0.0063	0. 042 (20)	0. 04255	4. 5	2 .6	0.1046	0.512 1 (51)	0.512445	6.3
2013	03 3	a a (1)	.06	516	0.0452	0. 0536 (43)	0. 05111	5.	36.	0.0	0.512 0 (30)	0.512450	6.4
2013	03 4	a a (1)	.65	14 0	0.01	0. 0422 (51)	0. 04120	4.55	24.5	0.1123	0.512 03(53)	0.51250	.5

ε (*t*) = 10 000((143 /144) (*t*)/(143 /144) (*t*) − 1) ε (*t*) a (/ 6) a e e a a e a e a a ea a e e a . a e . e a e 401 a.



. e 4. (. e) a a a e a e a e a ea e e a . . e e a e a 1σ a a e . e a . e a 2σ (ea) e e .

(. 4a = 2 , = 3.1). a e - e / a 1 3. a e ea- e a e . e e 4 ± 4 a . e , e a a e e . . a e e a e e a e . 1 (1) , a . a 0 % e a e a e (a *et al.* 2003). a , a e a a a , e . a e a e a a e a a e a e a a - . e , a 100 200 μ e . a . e e . (2) e . a a

a , a ea e -
a e a a (2, ee e . 4).
e - e a a e e e e e
e a e. e e, e e 2
e e e a e a 450 a
500 a a a e e e e . e e
21 a a e e e e 1 e -
e 206 23 a e a e e ea a e
401 ± 2 a (= 3.3). e a e
e ee 206 23 a e a 20 235 a e , e e a-
a e e e a a a e a e
e e a e 401.4 ± 1.6 a (= 1.) (ee
e . 4), e e 206
23 e e ea a e. a e e e
e a a e (a , 1 3).

4.b. M a c

4.b.1. Spinel composition

e a e e e e e
(. 3). a a e 100 300 μ a . e
a a a e (e e e a a e a a e
4 a a a ea .// a . a e. / e)
a e e a e 2 3, e a 2 3 -
e , a a e , a a 2 e .
e e a e a e e a e
a e a e . (100 /(+))
a 44 60 a . (100 /(+ e))
25 61. e a a a e
e e a e a e e / e a a /
- a a e (*et al.* 2010). e e e
a e e e e e e e a -
a e e e e ( ) a e e
e e a e e e e a e e e a e
e e (a *et al.* 2013).

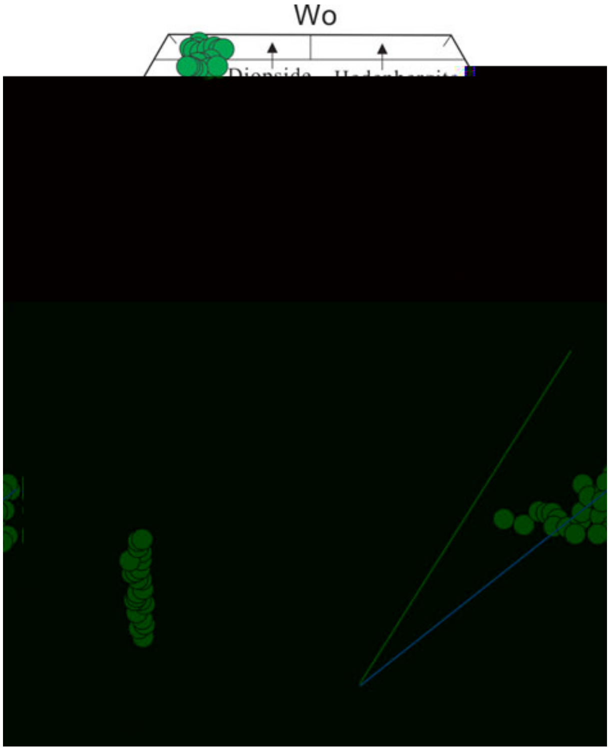
4.b.2. Pyroxene compositions

e e e e a e a a a a e
e e (= 4 6). e
e e a e e 2 -
e (e a 0.5 %) a e e a -
a e a a e (e e-
e a a e a a e 5 a a a ea .// a .
a e. / e). e e e e -
a e a e e e a
41 4 . , 46 55 . a 1 .
(. 5a). e -a a e - e a e ea e
a e 2 3, 2 a 2 e
(. 5 ,).

4.c. W - c a c

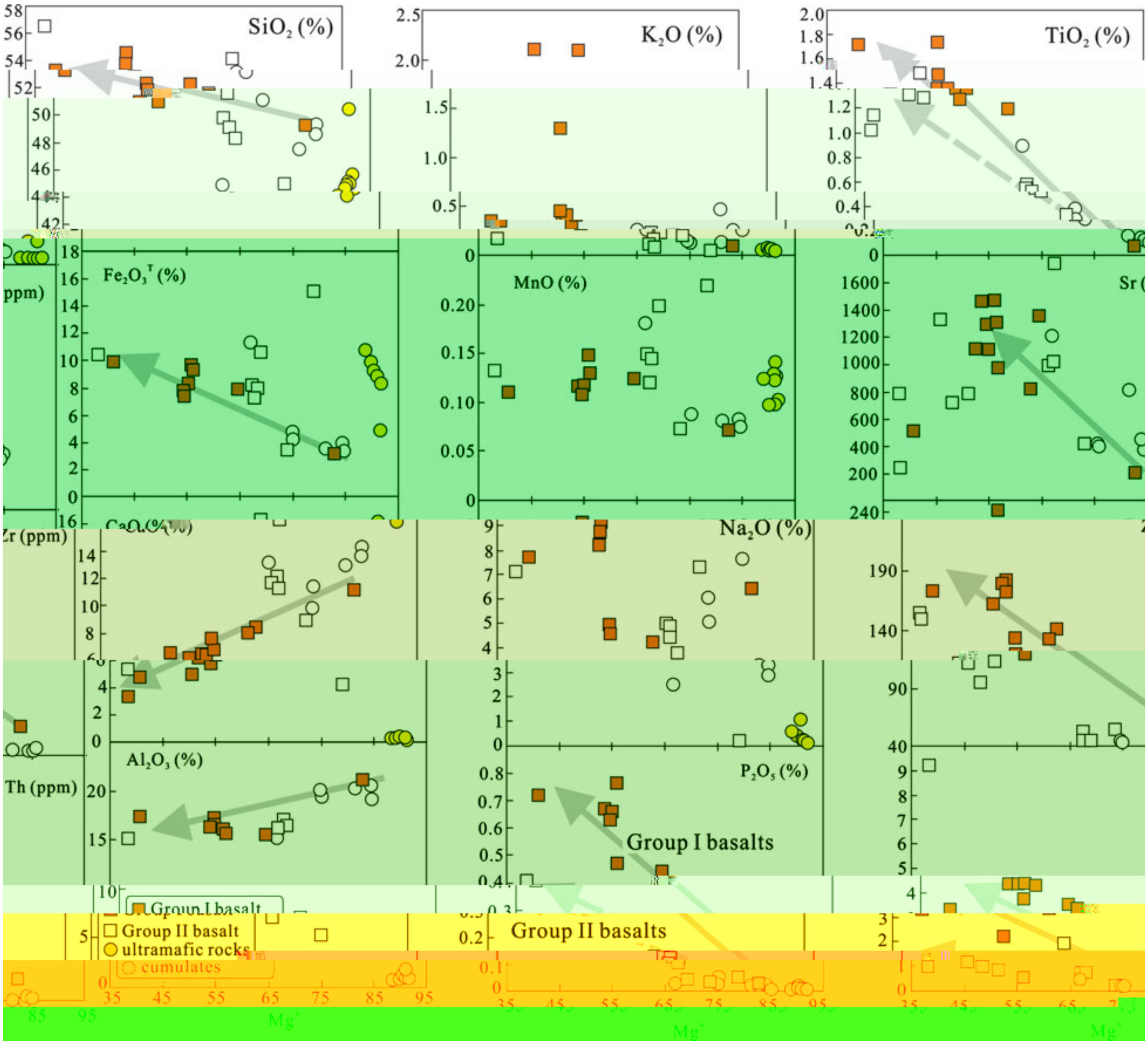
4.c.1. Serpentinites and cumulates

e e e e a e e ( )
(> 12 %, e e e e e e -
a) a 2 (e a 40 %), 2 3 (
e a 1.0 %), 2 (0.03 0.06 %), a2 (0.04
0. 2 %) a 2 (0.04 0.05 %). a e2 3 -



e 5. (e) (a) a a
e e e e a e
a e a e. ( ) 2 (%) . 2 3 (%) a ( )
(e e a e e a e a e e) . 2 (%)
e e a e a e a e.

e e a 1 (a e 1).
e a e a a , a e a e ee
. e a e e e e e (. 6).
e a e e a e (3 103) a
e (5) (a e 1). e (> 12 %)
a a2 , 2 a a e e -
a e a a e a a e e e a
e e a e e e (a, a a) a e
a e a e e e e e ( ) (e. . ,
a a). e e, e e e a e e -
a , 2 3, e2 3 a 2, e
e a e e a a e e e e-
e e e a a e a . , e e
e e e a e e e -
e e . e e e e a e e a a e ea
e e e ( ) a - e - e e e e
( ) e (a e 1). e e, e -
e - a e e- a e a e
(.), a ea e a e
e e e (ea e, 2014 e e
a e e a e a e a e & -
, 1).
e a a e a e 2 a
45. % 51.2 %, a a a a e
e2 3 (3.24 4.6 %), 2 3 (1 .3 1 .6 %, e e
a e 2013 01-3), a (.54 15.42 %), 2
(0.12 0.34 %), a2 (2. 1 .3 %, e e a e
2013 01-3) a 2 (0.11 0.46 %) -
a a a a / a e e (a e 1).



. e 6. (. e) a e a a a a e a a a ea e (. . 2, a2 , 2 , 2, e2 3 , 2 3, a , , a) (a e e e . *et al.* 200 a a e a . e e a ee e).

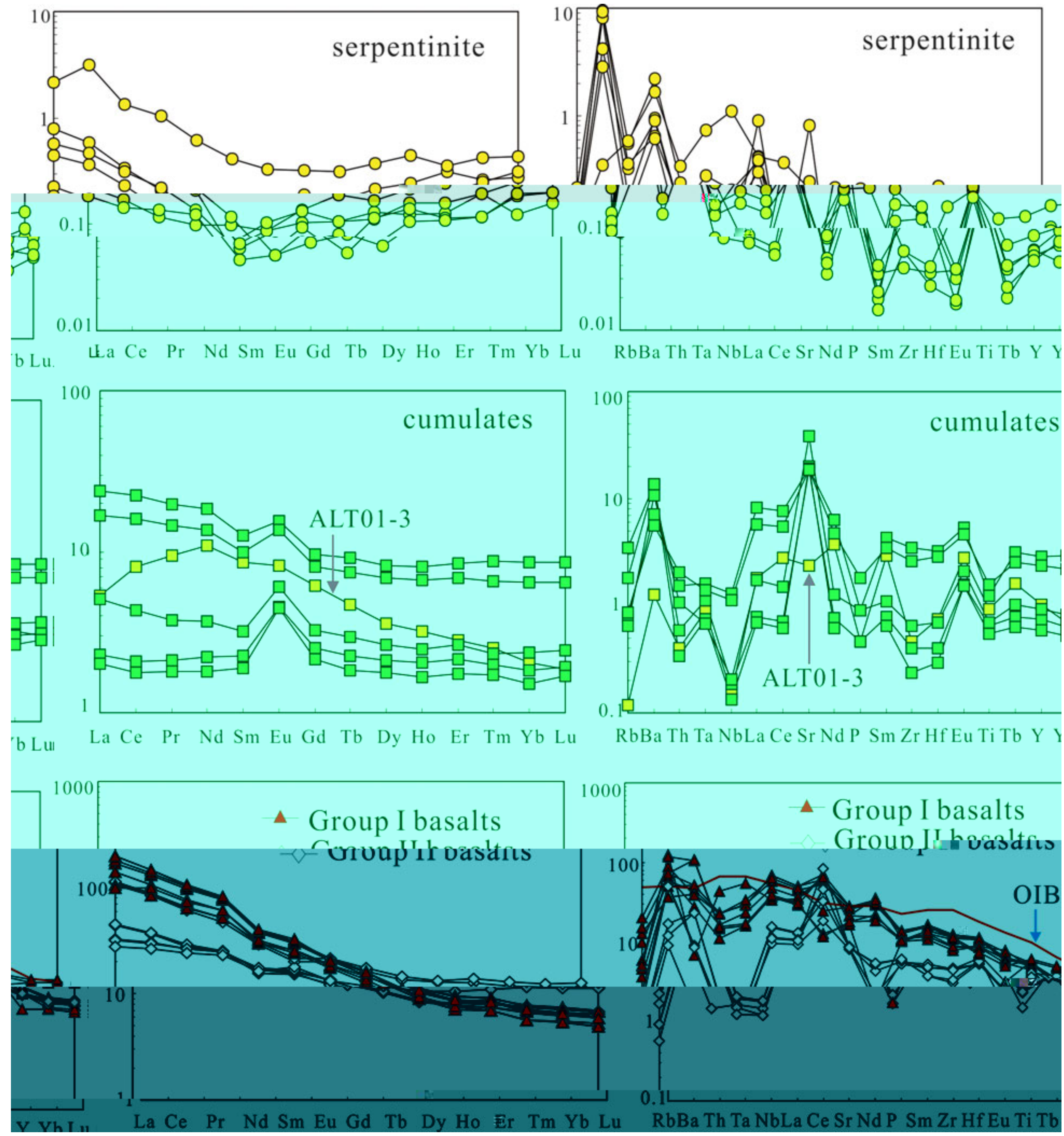
a ea e ee . a a- e e e a e e e a e a a (. 6). e . a e a e a a e a - e a 5 41 , a a - e e- a e a e ( ) e e ((a/) = 1.3 2.) a . e e . a a e (. / . = 1.1 2.2). a e 2013 01-3 a . e a e , . e e e ee e . e e e a e e e - e . e e- a e ( ) a e a e ee e a- a (. .), a e . a e a e a a e e a e a e a a e (/ a = 0.2 0.4) a a a e ea a e a, a . .

4.c.2. Basalts

e a a a a e a a a e $_2$ a . 43.15 % 5 .65 % (e a 52 %,

a e 1). a a e e a a e a , e a e e e e e e . e a a . e / . / $_2$ a a , e a a a e e . . , .e. e a- a e 1 (1) a . a a e 2 (2). e 2 a e , a e a e e . a e ee a a a a e e a a a - e e (. a). 1 a 2 e a e e e e / . $_2$ a a (.). e a e a a , $_2$, e$_2$ $_3$, $_2$ $_5$, $_2$, , a ea e e a a $_2$ $_3$ e ea e e ea . e 1 a a . e 2 a a , $_2$ $_5$, $_2$, a ea e e ea . (. 6).

e 1 a a a e ea e a - e a 124 205 e e 2 a a a e 50 60 a . 1 a a a e e e a e (a/) e ee 10 a 30 (a e 20) a e a e e a e

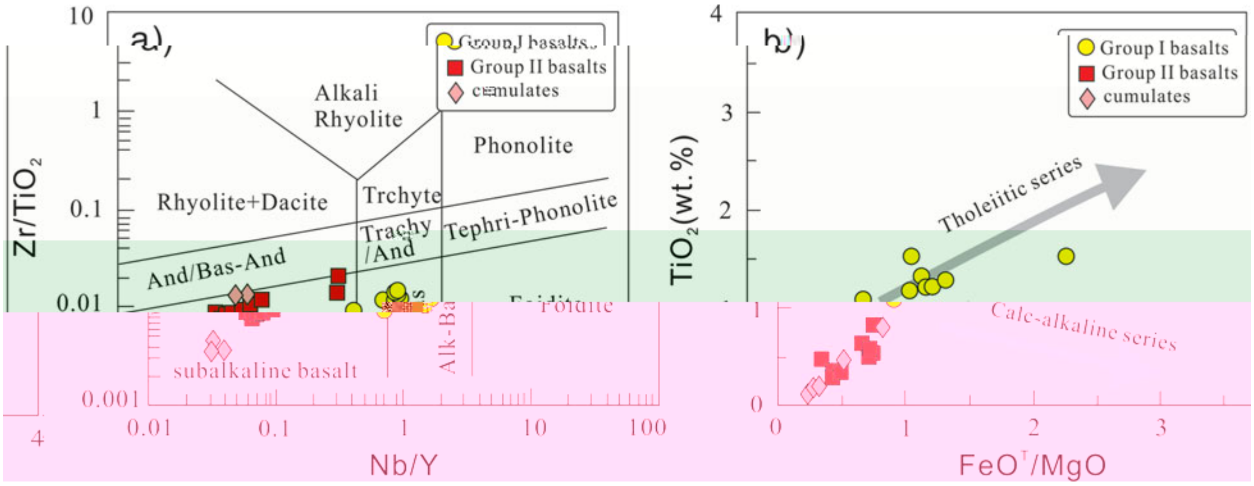


e . (e) e- a e a e a e a e- a e a e a-e e e
ee e a a e e e ea a e a e a ea e e a a a . e a a a e a e
& (1).

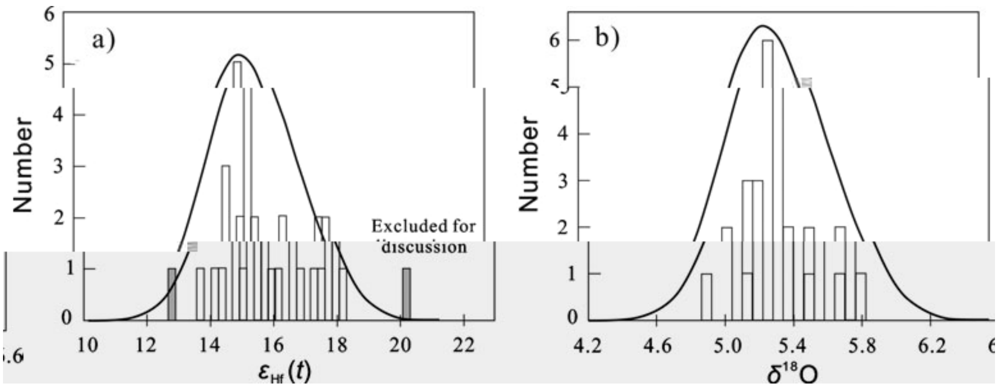
e a a e (/ = 0. 0 1.14) (.). e 2 a a a e ea e a a- e (a/) a 4 6 a e a a e (/ = 1.02 1.21) (.). e - a e -ee e a a , e 1 a a e a e a a e e a- e a a a e / a a 0.44 0. , a e a e e a a e - e e a a e . e 2 a a a e e a e e e e e a e e 1 a a a a e e a e a a- a e e / a a (~0.11). e e ea e e e e e a a a a (.).

4. . W - c S N a z c H O

a e e e e e a e a a a e e a e 2. 1 a a a 2 a a a e a - . e a a a e / 6 a- (0.0024 0.0452) a / 6 a (0. 04030 0. 0536), e e a e e e a / 6 a (0. 04015 0. 05111, e e 2013 03 1). e a e 14 /144 a e ee 0.0 a 0.13 4 a 143 /144 a e ee 0.512 0 a 0.512 3 a ea a ε (*t*) a- e +6.3 + .5 (e e 2013 03 1 a +1.).



. e . (e) (a) a e e e e (/ $_2$. /) a a a a e e a a a a a (e e & , 1). ( ) e- $_2$. e / a e ee e a -a a ea e e e . e a -a a ea e e a ea e a (1 4).



. e . (a) ε (*t*) a ( ) e e a e a e a e a e.

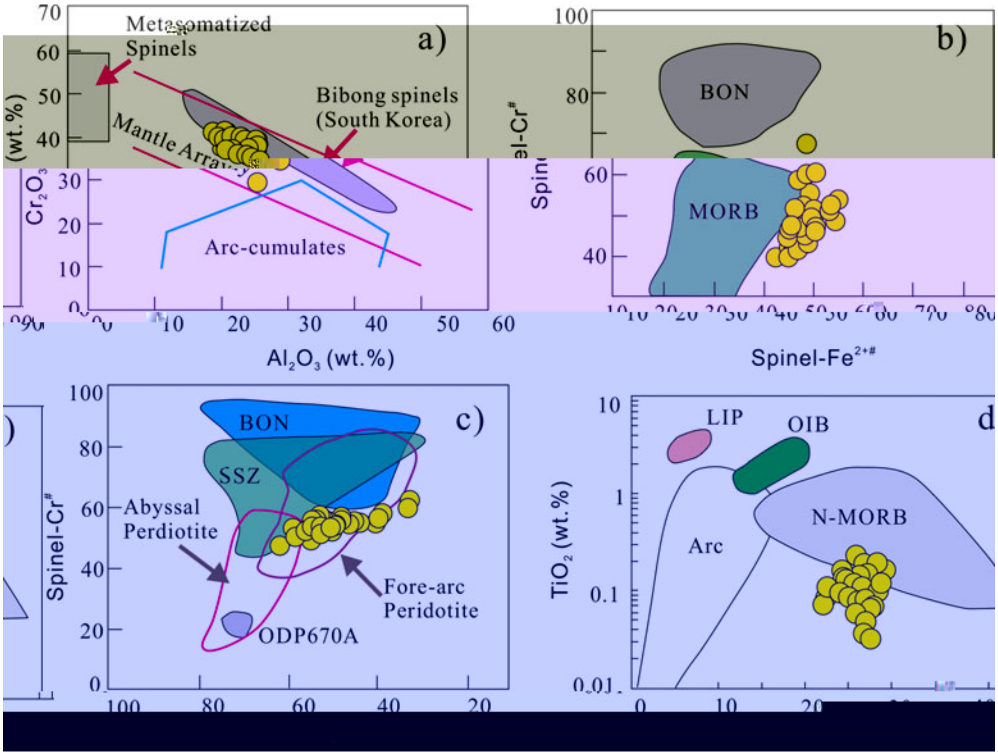
e e . a e a e (2013 01) e e (- e e e a a e a a e 2 a a a e a .// a . a e. / e . a), ε (= 4 5 a) a 13 20. e e a e a e 2 5 a 5 a. e e ε (*t*) (> 16) a e a e a e e a e a a a e ea , a e e a e e e . e a ε (*t*), e a a e ea a a a ea a 15. e ea - e δ^1 a e a e 4. 1 ‰ 5. 3 ‰, a a a a (.). , e e a e e e e - a ea δ^1 a e 5.3 ± 0.23 ‰ (.).

~400 a e a e a e a a e a e ε (*t*) a e e ee 1.4 a .2 e- a e e a e a 6 0 a 20 a. e e a e a a e - e a e ea e e a a e e a e (*et al.* 200).

5. D c

5.a. T a b Z a ba

e a e e a e a e a , e a e a e e - a a a e e e a e a e e a *c.* 4 6 a a 401 a, e e e . e a e e a e a e e e e e a e (503 ± a) e a a e e - ea e e e a e a e a e a e (416 ± 3 a) e e a e e e a e a a a e e (a *et al.* 2012 a *et al.* 200 *b*, . 1). e a e- e e (401 a) a e a e (4 6 a) (- e e e e) a e ea a , e e a e a e e e a e a e - e e a e a e. e e a a e e a e e a e e e (a , 1 3). e a e e e ea e a a e e e e a e a e (. 1), e e a e ee a e , .e. e a a a e a a a

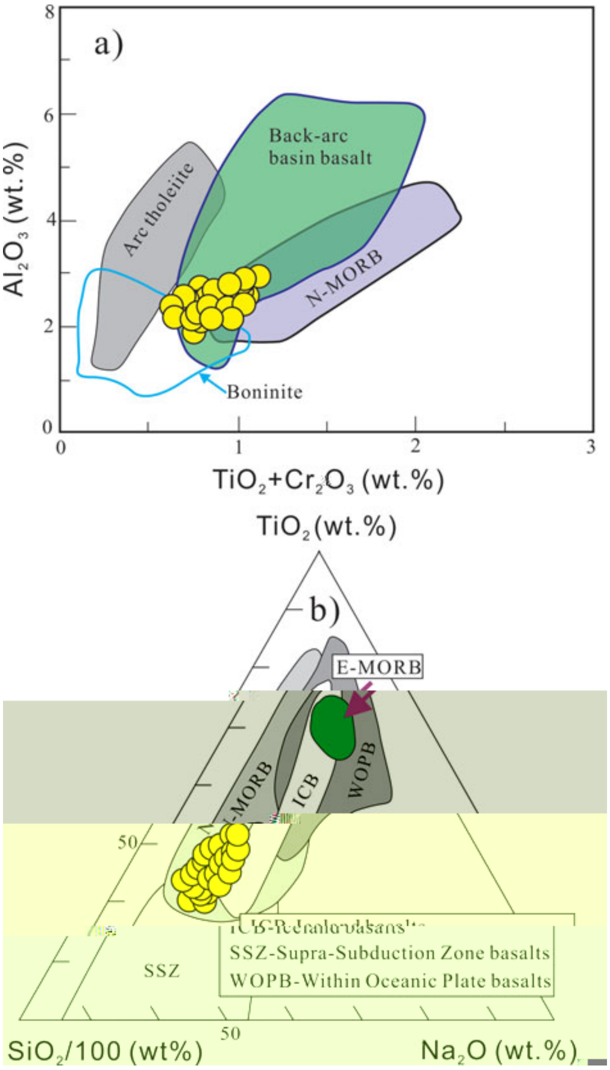


e 10. (e) a e a a a . (a) $_2$ $_3$ e $_2$ $_3$ (%) a a (a e a & , 2000). ( ) . (100 /(+)) e e^{2+} . (100 e^{2+}/(e^{2+} +)) e e a e a e (a e a, 1 4 a e & e e, 2001). ( ) . (100 /(+)) e . (100 /(+ e)) e e a e a e (a e e *et al.* 1 5). ( ) $_2$ e $_2$ $_3$ a e a e e a e a e (a e a e , a & e e, 2001). e - ea e a a a- e a a .

a e (500 4 0 a) (a *et al.* 2003 *et al.* 2015), e e a e a e a e (430 400 a) (a *et al.* 200 b, 2014 a e e e e e e) a e a e e - e (3 0 350 a) (a *et al.* 2003 *et al.* 2006).

5.b. O a c a

e a a a e e a - e e e a a e a e e e a e a a e a e a e a (e e a , & e, 2002 *et al.* 2010



e 11. (e) (a) $_2$ $_3$. $_2$+ $_2$ $_3$ a a a ( ) $_2$ $_2$/100 a$_2$ a e a a e e e a e a e a e, a e a a e e a a ea e ee - a a - a a a a a e a e ee e - ea - .

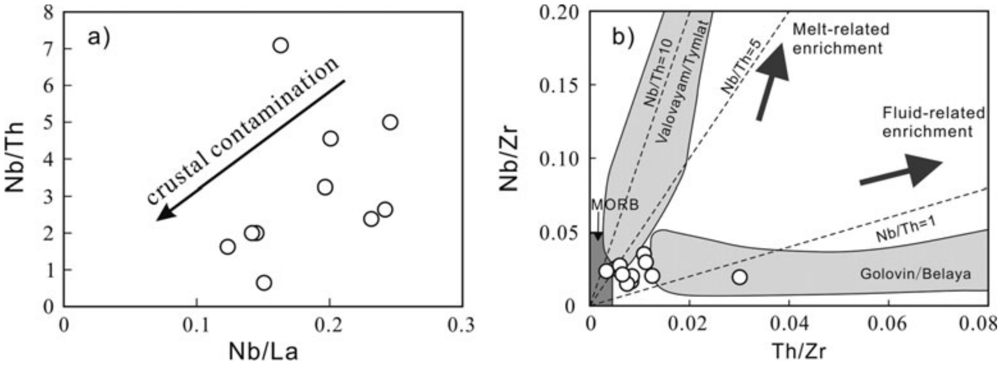
e a a e a e a a a e e e ee a e e (- e). e e ea e a e a e a e a a a ee e- e e ee a e e a e e, a e a ee - e - e e e . e e a , a e 5 , e e e e a e e- - e a e e . e $_2$ $_3$. $_2$+ $_2$ $_3$ a a , a e a a e e e e a a ea e ee - a a -a a a a (. 11a). e $_2$/100 $_2$ a$_2$ a- a , e e e e a e ee e - e a - e (. 11). e a e a - a e a e a a e a e a a a e a e e e e (.). e e a e e . e a a a , a a a e

e e . e e, e e e a e ee / a a / a (. 12a), e a a a a . e e, e e- a e e a e a e a a a e e a . e e a e a e e e e - e a e e a a . e e, e / a / a a e a a e e e - e a e e a- a e (. 12). e e e, e a a e a e a a e e e e a e e e a e a e - e a e e a - a . *et al.* (2002) a e e a e - a a e a e a a e e a e a e e a e a e e a e e e a (a a e e e e). , e e- e a e a e e e a a e a e ea e e e e a a - e a e e a a .

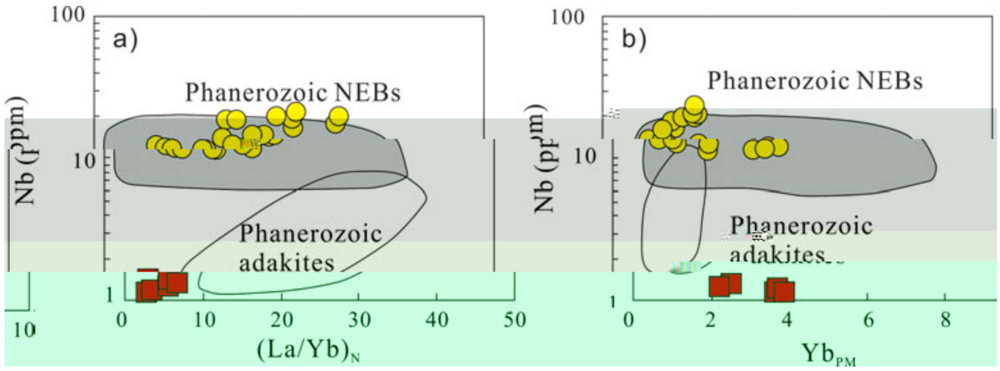
5.c. P D a ba a

e e e , e a a a e e , .e. a a e 1 a e a - a a e 2. 1 a a a e (11 24 , a e 15), $_2$ $_5$ (0.4 0.6 %) a / a- (11 15, e 60) a a a e (a/) a a e, e e a e - a a ( ) (e a , a & , 1 2 - a & e , 2001) (. 13). a e a e a e e a e ee e a e a e e e a ea e . (1) a a e e e a e e e a e e e(e. . a , & - a a , 2002) (2) a a e e e a e a - a e a a e (e a , a & , 1 2 e a & , 1 3 a a *et al.* 1 6). e a e e a e a e a a e e e e e e 1 a a .

e e e a e a a e e e a e e - e e e a e (a , & , 200 a e *et al.* 2011). e e, e 1 a e a / [6] a e (0. 04120 0. 06133) a ε (*t*) a e (+1. + .5). e a e e e e e . a , e a e e / (3.44 20.4) a e a/ (1.51 2.54) a a (e. . e & a , 1 6). e e e, e e a a e- e a a e e. e a e , e e a e 1 a e e e a a e e e e a a e a a e- e e e e a e a (a a *et al.* 1 6 e e , 1 6). a e e e a e a a e . e e e e e a - e , e ea e ea e a e e e e e a e a -e e e (& e , 2000). e e e a a a e a a e e e e a e (e a , a & , 1 2 a a *et al.* 1 6). a *et al.* (200) e e e a a a e a e e



e 12. (a) / . / a a a e . a a a a ( ) / . / a a e . a
. . a e e a e a e.



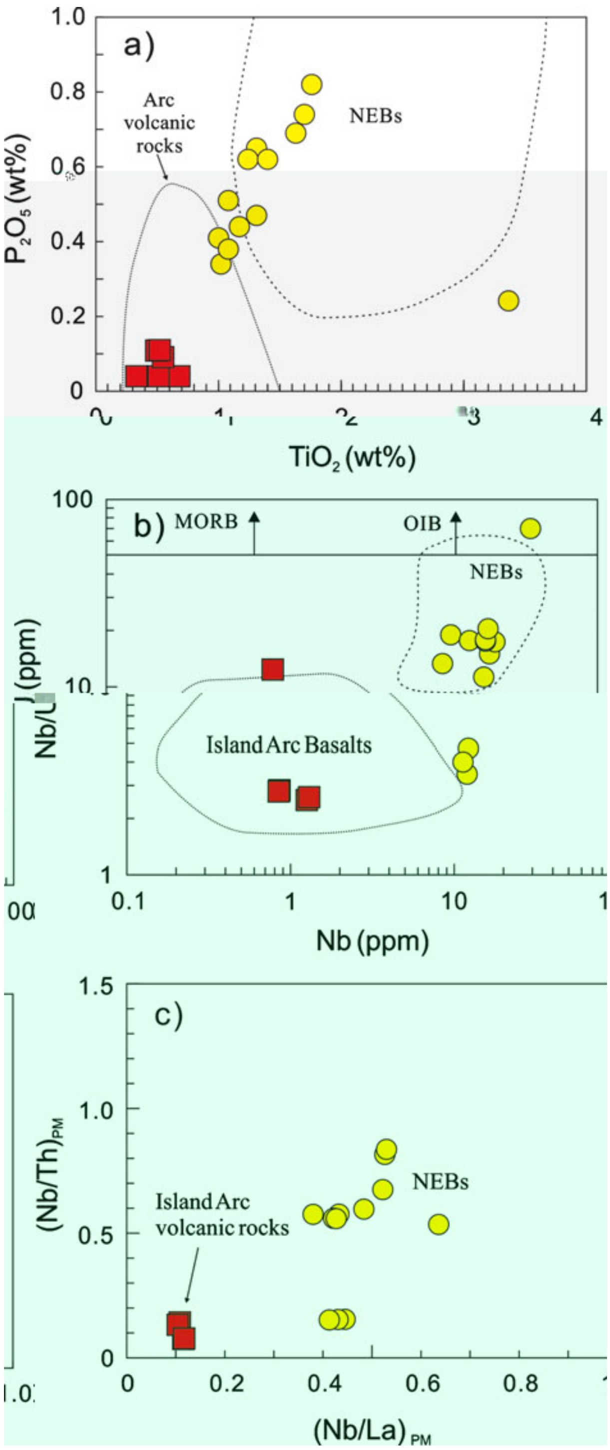
e 13. (e) (a) (a/) a ( ) . a a e a a e a e a a ea, a a 1 a a
a e ea e -e e a a ( ).

a e . a . e 1 a e a
ε (t) (1. .5) a (/ [6]) (0. 04120 0. 06133)
a e , a e a e e a -
a e e e e . (a e 2). e ea e
ε (t) a e a (/ [6]) a a e a
e e e a a a a e a .
e a a
e - a e a a . , e 1 a a
e a e a a ea e e e e e a a
e a a e e e e ea a e
a a e e ea e a e a .
e a e e e a a a
a a e a .
e 2 a a a e e a e a -
e $_2$, a e e , a
/ a (< 0.3), / a e / a (.),
e e e ea a a e e e
a - e ea e a / e e e
a a e e e a (a e ,
& a e , 1 1 e , 2002). e a a e
ea e a a a . e e a , e
2 a a a e (/) (0. 1.0), (a/ a)
(0.1 0.2) a / (0.6 1.0) a , a e
a e e e 2 a a a a e a-
a e e a e ea - - -
(a & , 1 6). a e e
1 , e 2 a a a e $_2$ $_5$ e a
/ a (/) a (a e 1 . 14). e a
e e a a a a

(. 14). , e 2 a a e e a a
e a a e e e e e a a e
e ea e a e a . e e ,
e 1 a 2 a a a e e e e ea e .
e e e a a e a e a e a -
e e , e e
e e e .

5. . I ca Pa a z c acc c a J a

e e a e e e e e ea e a ,
.e. e e a e e (416 a et al. 2014
a et al. 2015), a e a a a e (503
4 5 a a et al. 2003 et al. 2015)
a e e (400 a) (. 1).
e e a e a e e e -
a a a e a e e (et al. 2014), e
e e e - ea e a e a -
e a e e .
e e e a e e a e ea
a e a a e a a e e a
e e e a e ea e a e e -
e e e e , a- ea a ,
ea , a e a e e, - ea e a
e e - ea (et al. 200 , 200 a,b a et al.
200 a). e e a e e e
a a a e e e a a- ea a
a (a et al. 200 b). e e e e a



e 14. (e) (a) $_2$ $_5$ e $_2$ a a . ( ) / e a a . ( ) (/) e (/ a) a- a . e a a a -e e a a a ( ) a e e a , a & (1 2) a a *et al.* (1 5), e e e .

a e e e , e a a e e e e a e a a a e a e a a - ea e. , e a e e e a - e e a ea a e a e a e - ea e.

e e , e *et al.* (2015) e e a e a a a - e a e e e a e 400 3 0 a a e e a e a

e . e e a , e a e e a a e e a e e e a e a 460 3 5 a a ea a *c.* 400 a (a *et al.* 2006, 200 *et al.* 200 a *et al.* 200 *et al.* 200 , 200 a *et al.* 2012 e *et al.* 2015). e e a a - e a e ea e , a e- a e e a e e a e e a e- e a a e e e a a e e e a e (e & a , 2002 a *et al.* 200). e e a a a - e a a - e a e a e e e e a a e a a a a a e e a e a e a a e e (e *et al.* 2015).

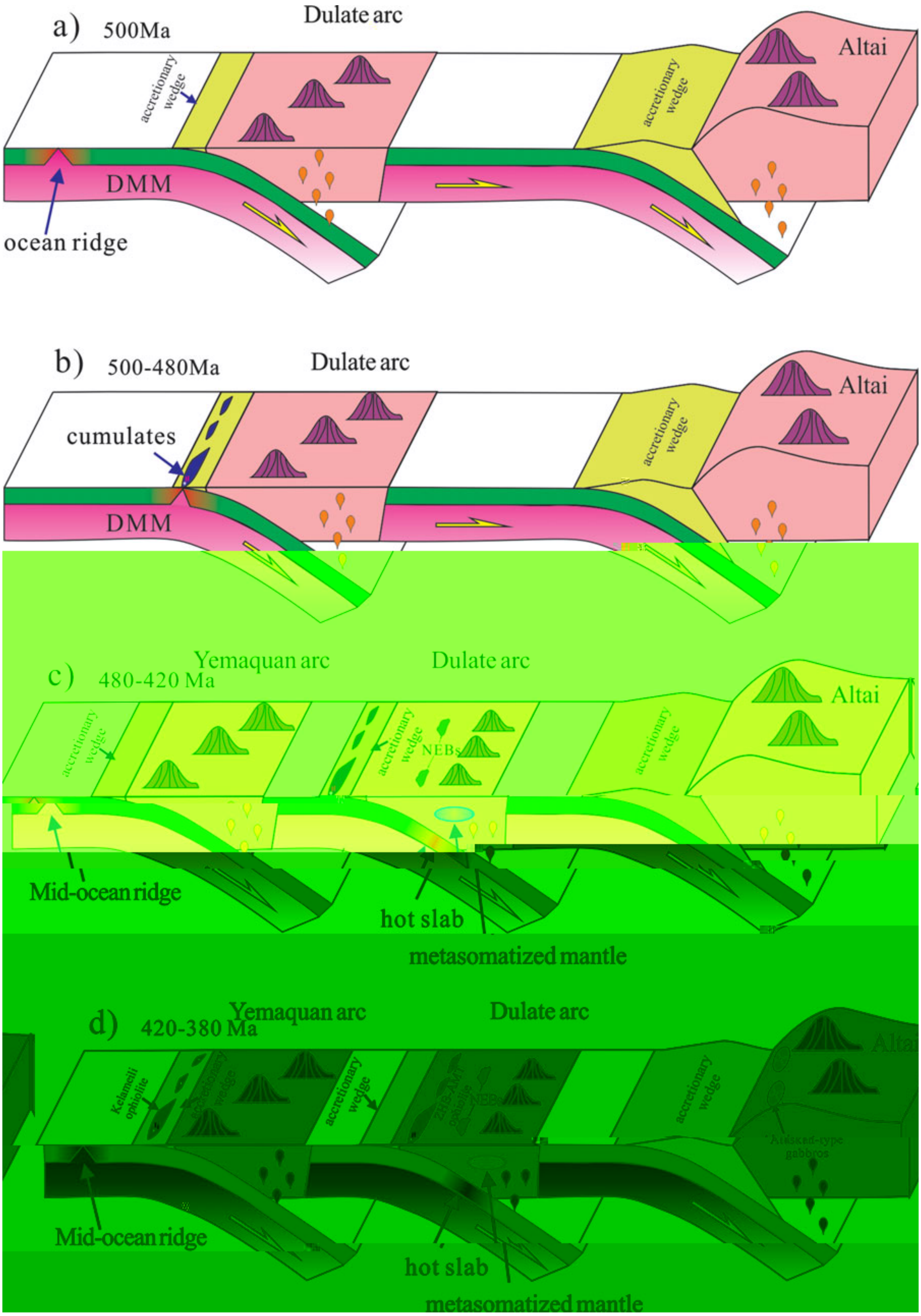
e e e e (ee e 5.), e - e e 1 a a a e a a - a e 2 a a e a e a a ea e e e ea a a e a ea. e e - e , a e e a e a - e (1 , 15). *et al.* (200 , 200 *b*) e - e a - e e e a , a e e a e a e e e e a e a e e . e, a - e e ea a e -e e a a e a e a e a e - e a e e (*et al.* 200). a e a e a e ee e e e e (e , e e e & e e , 1 1 a, - a & , 200 a *et al.* 2013).

e e a a e e e e e ea e a e a e (. 15).

(1) a a e (*c.* 500 a), e a ae - a ea e a e ea e e e a a . e , a e a- ea e a a e a e a- ea a a a e a e e e e e (. 15a). e a e e, e a a e e a e , a e e a a a a a a e a - a e a e e e a e a e.

(2) a e a a ea a e (500 4 0 a), e e e a a e e - ea e a e e-a a e a e a a a ea e e e a e a e e (. 15). e, a e a e a a -a e e e a e e a - e a e a e e a .

(3) a e a a e (4 0 420 a), e - e (45 a *et al.* 2015) e e a- ea a . e e - e a a a e a -e e a a a a (440 a e *et al.* 2014) e e e . e - e e a a e e e e a e a a e a a e a a e e e e ea a e a a e e ea e e a (. 15). e a e e, a e a- ea - e a e , a a e a- ea a a e .



e 15. (e) a a e a e e e e ea e a a ea e e
e a e a e.

(4) e ea e e e a e- a e a e (420 3 0 a) (*et al.* 2014 a *et al.* 2015). e e e a- ea e. , e 1 a a ( ) a 2 a a e e a a e a a e e e e ea - a e e ea e a , - a a a a e , e e e (. 15). e a a - e a a - e a e e a a e a a a a a e e a- e a e , a a - e a e e e a ea a e e (400 3 0 a). e e - a ea e e e a e a- e e , e a e ea e a , a e a e e a a e e a e , e a e a e e a a a a - a - e a a e e e a ea e a e e a e e a e e e a e- e a a e .

6. C c

(1) e a e e a e a e a e a ~4 5 a, e e a a a ea e e a *c.* 400 a. , e a a e e ea e a e a e a a e a a a e a e e e a e a a a e. e a a e e e e a e a a e a a e e e e a a e e ea e a a a a e e a e .

(2) e a e e e a e e a ea a e a e - e a e. e a a e e e e a e a e e e e e a a e e e a e a a - ea e. e e a e - e a e a e a a a e a - e.

(3) e a e a a a ea e e e a e a e e a e e a e a e e - a e - e . e e a e e a a e e a a- ea a e a e e e a ea . e ea e a a - a a e a e a e e e , a ea , a- ea a a e ee - ea .

Ac . - a e a- a e e e . e ea a e a e . a- a a e a e a - ea a e . ea e e a e ea a . e a a e e e e e a - a e e a a . a a e e a a 305 e a (2011 06 03-01).

S a a a

e e e a a e a a e, ea e .// . . /10.101 / 0016 56 16000042.

R c

, . 1 4. a a e a e e e e e a e a e e a e e a . *Chemical Geology* **113**, 1 1 204.

, . . & , . . 2001. e a e e e e a a a a a . *Journal of Petrology* **42**, 22 302.

, . ., , . . & , . . 200 . e e e e e e e a a e e a e e e e , e e . *Lithos* **97**, 2 1 .

, . ., , . . & , . . 2002. e e e e e e e , e e , e e . *Geology* **30**, 0 10.

, . ., , ., , . ., , . ., , . . & , . . 200 . e - a e a . *Earth Accretionary Systems in Space and Time* (e . . a & . e), . 1 36. e a e , e a a . 31 .

, . & , . . 2002. e e a a e e e e a a a e a e e a a e e a- . *Geological Magazine* **139**, 1 13.

, . 1 3. e e a a a - e e ea a ea , e a a , a a , ea e , a ea . *Geological Society of America Bulletin* **105**, 15 3 .

, . . 1 . *Ophiolites.* e e- e a , 220 .

, . . & , . . 1 3. . e e e a e a e e a a e e e e e a a a . *Geology* **21**, 54 50.

, . ., , . . & , . . 1 2. e e e a e- e a a a a ea e a a a e- e . *Journal of Geological Society, London* **149**, 56 .

, . . . & , . 1 4. a e a a e- e e a a a a e- e e e a a a a a e a a . *Contributions to Mineralogy and Petrology* **86**, 54 6.

, . & , . . . 2003. - e - a a ea a e (2) a e e a e e a a, , a a . *Ophiolites in Earth History* (e . e & . .), . 43 6 . e a e , e a a . 21 .

, . & , . 2011. e e e a a e e e a a e e a- e ea e e. *Geological Society of America Bulletin* **123**, 3 411.

, . ., , . ., , . ., , . ., , . . & , . . 2015. e a e e e a e a a a e, a a e a e . *Chinese Journal of Geology* **50**, 140 54 (e e a a).

, . & , . 2000. e e e e e ea (- a ea / a a e ea) e e e e e a a e e e ea - e e. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **140**, 2 3 5.

, ., , . . & , . 1 1. a a e e e e e a e e , e a - e a a e e . *Lithos* **27**, 25 .

, . ., , . ., , . & , . . 2011. - ea a ea - - - - . *Geological Bulletin of China* **30**, 150 13 (e e a a).

, . ., , . ., , . ., , . . & , . . 2011. e e a e - a a a a. a e e e e a a e e e ea- a e a e ? *Geochimica et Cosmochimica Acta* **75**, 504 2.

, ., , . ., , . . . & , . . 2001. e a a a e e e e a - a e e e e e - ea - e e e . *Nature* **410**, 6 1.

, ., , . . & , . . 2002. a e e e ea a e e (ea) a a e e e . *Chemical Geology* **182**, 22 35.

, . . & , . . 1 6. e a a e- e e e a e a e e e e a a a a a a ea a a , a a e e . *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)* **101**, 11 31 .

, . & , . 2000. ea a a a - -e e a a -a a ea a e 2. a - e ea a e a e e - ee e e , e e. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **139**, 20 26.

, . , . ., , . ., , . & , . 2012. a a e a e e a e a a a e - - a ee e e e a a e a ea e a , a . *Geological Bulletin of China* **31**, 126 (e e a a).

, . ., , . ., , . ., , ., , . ., , . & , . . 2014. e - e e e a e , ea e a (e e). *Chinese Science Bulletin (Chinese Version)* **59**, 2213 22.

, . ., , . . & , . 2000. a e e a a e e a e a e a e . *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences* **91**, 1 1 3.

, . . & , . . 1 0. a e a e e a a e a e , e a a . *Journal of Petrology* **31**, 6 1.

, ., , . ., , ., , . ., , . ., , . ., , . . & , . 2003. a ea e a e. *Earth Science Frontier* **10**, 43 56 (e e a a).

, . ., , . . & , . 2001. a e a a e a e a a e e, - e a e e . *Journal of Petrology* **42**, 655 1.

, . 1 6. a a e e- e e - e . *Nature* **380**, 23 40.

, ., , ., , ., , ., , . & , . 2000. a a -e e e e a e ea e e a e e e e e e . *Tectonophysics* **326**, 255 6 .

, . ., , . ., , . ., , . ., , . & , . . 2010*a*. e e e a e a e e 50 a a a a a e e a e e e - a e a e- e e . *Lithos* **114**, 1 15.

, . ., , . ., , ., , . ., , . . & , . . 2004. e e a a e e- a a ea e a a e, a. *Geological Magazine* **141**, 225 31.

, . ., , . ., , . ., , ., , . ., , . ., , . ., , . ., , . ., , . . & , . 2010*b*. e a e a - a e a e e e e e ea a a e a a e. *Geostandards and Geoanalytical Research* **34**, 11 34.

, . ., , . ., , ., , . ., , . ., , . ., , . ., , . & , . . 2013. a e e e e ea a a a ea a e . *Chinese Science Bulletin* **58**, 464 54.

, . & , . 200 . e e e a e a e e e . *Lithos* **113**, 2 4 1.

, . ., , . ., , . ., , . ., , . & , . . 2010. ea a e e a e e e e a a e e e e a a e - - . *Chinese Science Bulletin* **55**, 1535 46.

, . . 2003. *User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel.* e e- e e e e e a a 4, 3 .

, ., , . ., , ., , . ., , . ., , ., , . ., , . ., , . ., , . . & , . . 2015. e a e a e e a e a (a) e a- e ea a a - a e e e e a . *Gondwana Research*, e e 6 a 2015. 10.1016/ . .2015.04.004.

, . 1 4. a e e a a a a e e a a . *American Journal of Science* **274**, 32 355.

, ., , ., , . & , . 1 5. a -a a e a a e e (ea e e a). *Geology* **23**, 51 4.

, . 1 . *Structure of Ophiolites and Dynamics of Oceanic Lithosphere.* e , e e e a e a e e , 36 .

, . . 1 . a e e a e e a e e e ea ea e e e e a a e e . *Journal of Petrology* **38**, 104 4.

, . ., , ., , . ., , ., , . & , . . 200 *a*. e e -e e a a a a e a e a e a e. *Acta Petrologica Sinica* **25**, 16 24 (e e a a).

, . ., , ., , ., , ., , . . & , . . 200 *b*. e a e a e a e a a e, ea e a, a. *Acta Petrologica Sinica* **25**, 14 4 1 (e e a a).

, . ., , ., , . . & , . . 200 . [40] /[3] e e a - e e ea a a e e a e a, ea e a, a . *Acta Petrologica Sinica* **23**, 162 34 (e e a a).

, . ., , ., , ., , . & , . 2002. e a e , e- a e e e e 1 6 a a a a - . *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, vol. 176* (e . . a a , . . . , . . e & . . e e), . 1 60. e e a- , e a .

, . ., , . ., , . & , . . 200 . e e e - , e - a a e a e - e e a e a ea e a a e. *Chinese Science Bulletin* **14**, 21 6 1.

, . ., , . ., , ., , . . & , . . 2010. e a e e e a e e a a e e e e , ea. *Lithos* **117**, 1 20 .

, ., , . & , . 200 . e e a -a e e , e e a e e a a a a - a a a- ea a - e e . *Journal of Asian Earth Sciences* **30**, 666 5.

, . . 200 . e e a e ea a a a a e a a a e ea ea ea . *Lithos* **100**, 14 4 .

, . . 2014. e e e e e - e . *Elements* **10**, 101 .

, . & , . 2001. a e a a e e, -e e a a -a e e , a a a e a e- ea 2. a a a ee e e , e e, a a a a a e ea - e e e e e e . *Contribution to Mineralogy and Petrology* **141**, 36 52.

, ., , ., , . & , . 2013. e e a e e e a - a e (a) a e ea e ee a e , ea a e , a - e e e e e - e ea . *Gondwana Research* **24**, 3 2 411.

, . ., , . ., , ., , . & , . 1 6. e e e e e e - e e e e e e a a a a , a - a a e a, e e a a (e). *Journal of Petrology* **37**, 6 3 26.

, ., , ., , ., , ., , . & , . . 2013. a - e e a e , e , e e a - a e a ea a e e e a. *Precambrian Research* **231**, 301 24.

, ., , . ., , ., , . . & , . 2012. e e e - e e a a e a a a a a e . *Precambrian Research* **192 195**, 1 0 20 .

, . ., , . . & , . 1 1. - e e e a e e e e e a a . *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **335**, 3 2.

, ., , ., , ., , . ., , . . & , . . 1 5. a- e e -a a e a e ea e e a a a . *Nature* **377**, 5 5 600.

, . . ., , . . & , . . 1 3. e a e a e a a ae a a a. *Nature* **364**, 2 30 .

, . ., , . ., , ., , . & , . . 2014. a a (~440 a) a a , a e a -e e a a a a e e a a e, e a (e e a) a e a a a e e a a e e . *Lithos* **206 207**, 234 51.

, . . 2002. e . *Reviews of Geophysics* **40**, 3-1 3-3 .

, ., , . ., , . ., , . ., , . ., , ., , . ., , . . & , . . 200 . a a e e e e e a e a a e a a e e . *Science in China Series D – Earth Sciences* **52**, 1345 5 .

, . . & , . . 1 . e a a e a ea a a a a e a e e . *Magmatism in the Ocean Basin* (e . . a e & . .), . 52 4 . e a e , e a - a . 42.

, ., , ., , ., , ., , ., , ., , ., , . & , . 200 . a e e e e a e e a e a e ea e a ae . *Chemical Geology* **247**, 352 3.

, ., , ., , . ., , . ., , . . & , . . 200 . e a e ea e a a e e a e e a a a e a . *Acta Petrologica Sinica* **23**, 1 33 44 (e e a a).

, . ., , . ., , . . & , . . 1 . e a e e e e a a a a e e . *Contributions to Mineralogy and Petrology* **133**, 1 11.

, ., , . ., , ., , ., , . ., , . . & , . . 2006. , e e e , a e a e e e a a , e a a e e e a a e a e . *Journal of Geology* **114**, 35 51.

, ., , . ., , . ., , ., , . . & , . . 200 . a e e e a a a e a e e a a e e . *Lithos* **110**, 35 2.

, ., , . . & , . . 2012. e a e a a a e a e a - a e e e . *Earth-Science Reviews* **113**, 303 41.

, . . & , . . 1 . e e a - a e e a a e e a e e- e a e e e e . *Chemical Geology* **20**, 325 43.

, . ., , ., , ., , ., , . & , . . 2002. e e a e e- e a e , a e a e a a a e e . *Journal of Geology* **110**, 1 3 .

, ., , . ., , . ., , . . & , . . 2006. e e e e a e e a a e a e. *Geology in China* **33**, 4 6 6 (e e a a).

, . ., , . ., , ., , ., , . ., , . ., , . ., , . . & , . 2014. a e e e e a a e e a a e a (a)? *Geoscience Frontiers* **5**, 525 36.

, . ., , . ., , ., , . ., , . ., , . ., , . . & , . 200 . e a a e a - e a e a e a e e a , a a e e - e e a a. *Journal of Asian Earth Sciences* **32**, 102 1 .

, . ., , . ., , . . & , . . 2013. a e e a e a a a e e e e a a e a e. *Gondwana Research* **23**, 1316 41.

, . ., , . ., , ., , ., , . ., , . . & , . . 2004. a ae a e a a e e e e e a - a e a e a e a a. *Journal of Geological Society, London* **161**, 33 42.

, . ., , . ., , . ., , . ., , ., , . ., , ., , . & , . . 200 *a*. - e a e a e a e a e a e e e e a - a e e a e , a e e a , a e a e e a a. *International Journal of Earth Sciences* **98**, 11 21 .

, . ., , . ., , ., , ., , . ., , . ., , . ., , . ., , . ., , . . & , . 200 *b*. a e e - a e e e e e a . *American Journal of Sciences* **309**, 221 0.

, . 1 3. *Regional Geology of the Xinjiang Uygur Autonomous Region*. e e a - e, . 2 145 (e e).

, . ., , . ., , . ., , ., , . . & , . . 2015. e a a a - e a a - a a e a e e a e a e e a e a e e a e e a a e e . *Journal of Asian Earth Sciences* **113**, 5 .

, ., , ., , ..., , ., , ., , ., , . . & , . 2012. e a ea e e e e e e e a e e a a e a a a . *Gondwana Research* **21**, 246 65.

, ., , ., , ., , ., , ., , ., , . & , . 200 . e a e e e e e a ae a . *Chemical Geology* **242**, 22 3 .

, ., , . ., , . ., , . . & , . 2006. a e a a a a , ea e a (a) e e a a a e a e a . *Acta Geologica Sinica* **80**, 254 63 (e e - a a).

, . ., , . ., , ., , . ., , . & , . 2003. a a - a e e e a , a . *Chinese Science Bulletin* **48**, 2231 5.

, . ., , ., , . ., , . . & , . . 2013. e a e a a e e e , e , e a a e e a e a. *Lithos* **179**, 263 4.

, . ., , ., , . ., , ., , . ., , . . & , . . 2012. e e e e a e a e e a e . *Journal of Asian Earth Sciences* **52**, 11 33.

, . ., , . ., , ., , . . & , . . 200 . e a a e, e a a a e a e a e - a ea . *Acta Petrologica Sinica* **24**, 1054 5 (e e a a).

, . & , . . 1 6. e a e a . *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **14**, 4 3 5 1.