Geol. Mag. **154** (*3*), *2017*, *pp. 419–440.* © *Cambridge University Press 2016*
.10.101 / 0016 56816000042

e a e c e e a e a e c e ea e a e e a a e c e ( ). ca e acc e ce e a e a e

- ‡, - ‡†, - , - ‡
& - ‡

e e ca e e ca c e ce , e , 10003 , a
‡ a e e a e a e ce , a 210016, a
e a e e c e ce , ve , , 3684 -5305,

(*Received* 18 2015, *accepted* 8 a a 2016, *first published online* 18 2016)

Abstract e e e e e va , c a e a e c e ca a a e c e e e e e a e a e c e ea e a e e a a e c e ( ) e a e a e acc e ce e ea e a e a e. e c a e a a evea a e c a e e a e a e c a e a ~485 a e e v ca c e e ce e e a ~400 a. , e v ca c e e ce a e e e e a e a e. a e e e e e ave c a a e e e e a c e e - e e . a , e a c e e a ve c ε (*t*) (13 20) a a e δ^{18} (+5.3 ‰) va e e c a e a e c a e c a e ve a a e ve a e e e a e ce. e e a a c c ca e a e a a e a e a a ea e e e ve a a e a a e e e e ea a e a a c e a / c - e a e . e a a e e e c , e e ev e , ca e a e a e a a a a e a e e e - e, c e a e e e e a ea - cea e v c a ea ev a e e a cea . e ea e a e, a- cea c c e e a e a- cea c a c, a e e e a e e acc e e a a- cea c acc e a e e. e a e a e, e a e a a a e acc e e e acc e a e e a e e a e e e e - ac e c e .

e . a e a e, - e, acc e ce , e a a e c e ( ), a e a e .

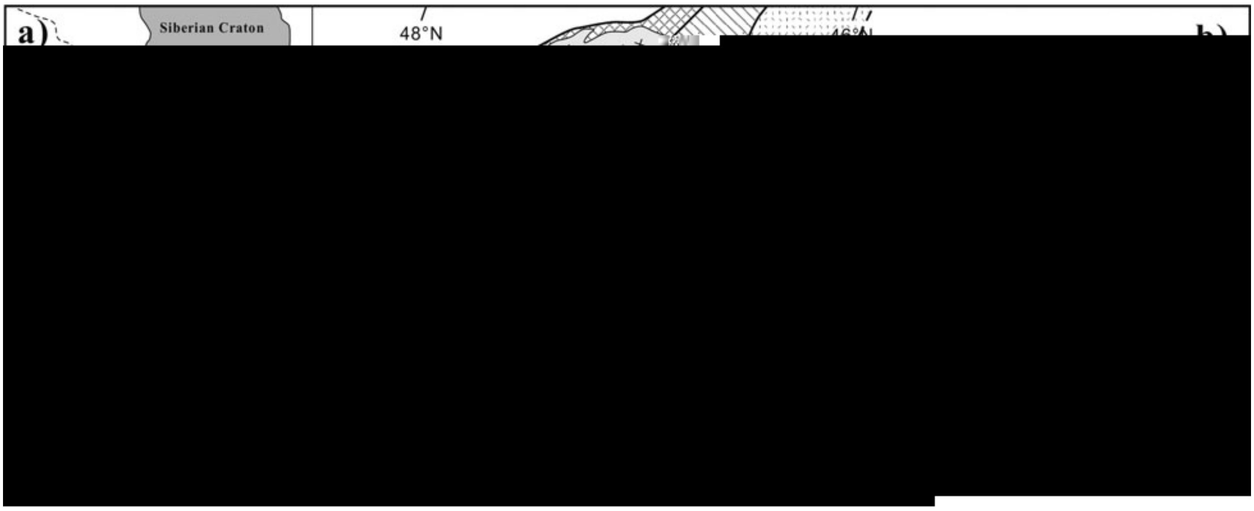
1. Intro uct on

e , a e a e e e e e va e , c e e a cc a e e c a - e a acc e a - e e c e (e. . a *et al.* 2008, e & e , 200 , e - a a *et al.* 2012, a *et al.* 2012, 2013, acca *et al.* 2013), c a a a a a - a e e cea c a e, e cea c e a a ce a e ec c ev e e (, 1 , a *et al.* 200 , a *et al.* 200 *a*). a ca e a ee e e a e e ce e e - e e (e a , 1 , c- a , 1 8 , , 1 3, a a e e *et al.* 2000, e & e , 2003, a *et al.* 200 , ea ce, 2014). a ece e , e & e (2011) c a - e e a . c e a a - , - cea e, e, a- c e ( ), v ca c a c a acc e a . - e e e e e c e , ea ce (2014) v e - e a e , .e. - cea - e e a - e e. e - cea e e ca e v e - e, - e a - e - e , e e - e e e c e a c - a e, ac -a c a e a e- c e.

a e e c e e a e e - e e e a a e c e ( ), e a e a e c acc e a e e (, e ö , a a & a , 1 3, a , & e , 2000, e *et al.* 2002, a *et al.* 2004, 200 *a*) (. 1a). e a e e e e a e e a e c, ca e ev - e (a *et al.* 200 *a*,*b*, e , e & a , 2012). ea e a , c e e a ec e , ev- e a e ave ee e e ve e a e ea , c , , e e a e , a e a a a , a a a a a e e (a , 1 3, a *et al.* 2003, a *et al.* 2003, a *et al.* 200 *a*) (. 1). a - e ave ee ca e e e e , e e- a e c a c a , e c , e c e

---

† c e e ce. c a 1 68 a .c



[redacted]

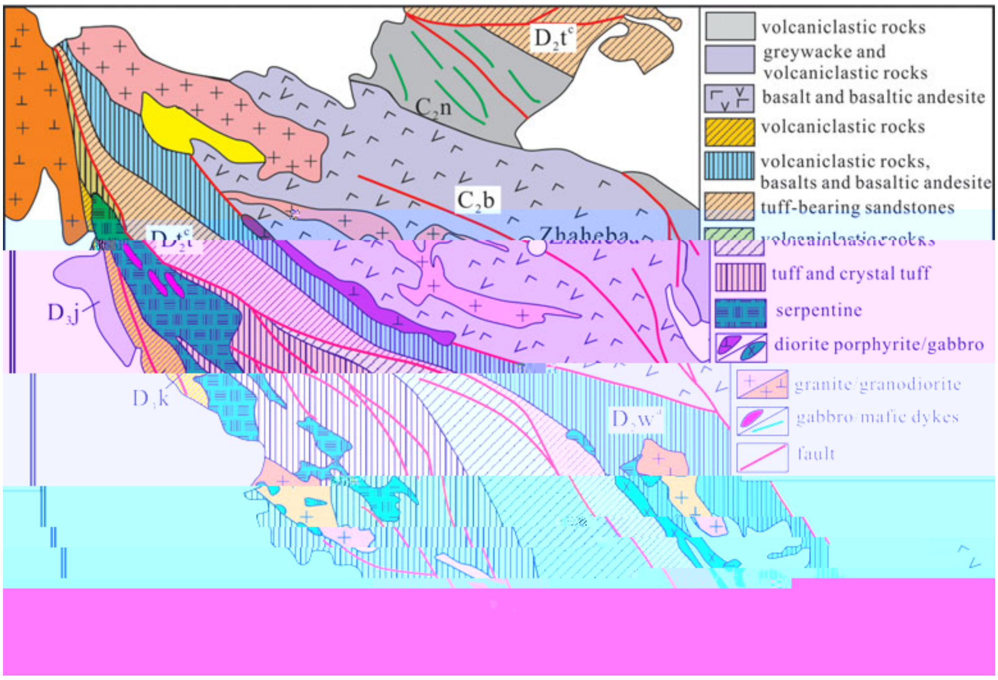
e 1. (a) c e a c e ca a e e a a e c e ( ), ( ) e e a e e ca a e e e ea e a a a e e e ea e a a a e e e (e a e a *et al.* 200).

a ec c c a ce e a e . c , e e e a e e - e va , e a , a e a e c e e a e a ec e e e a e a e a e e (1) e e e a e acc e v a e e e ea e a e a e a (2) ec e e c a ce ve e- e c a e a e.

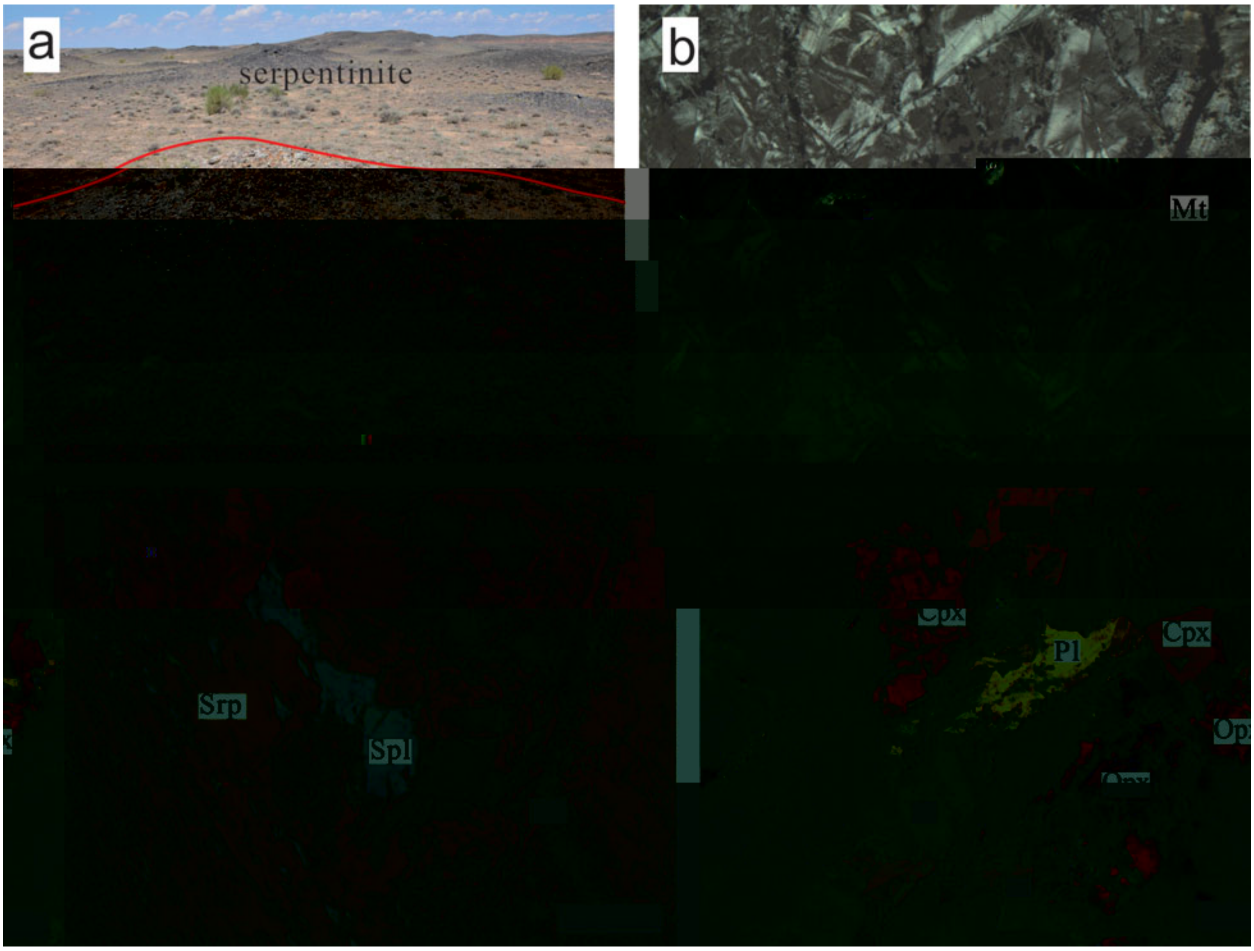
2. Reg onal geology, fiel observat ons an petrography

e a e a ec e e e e e e - e e ec e a e a a a e e , c e a e e a e e e a ec (1 , 2). e a c c e e e e, c a e, a a c a e c ava a a ca a e. e c a e c e a a e a c a , a cc a a c e e ve eve a e e a e e e . e c a e e e e e c e a a ee e ve (. 3a). e e va e - e a ea 15 c a e c a e . e e - e e c e e a c - a e e e e e e ev a a a c a e c e e a e e ce (. 2, ee e c). cca a a a e 1 5 e a e a 1 ca e ee e e e e. v e e a a e e e c a e e e e e. e e e -

ec e > 0 % e e e, a e e a e (. 3 , c). a e e e e a cc e e e e e e a e - c e e a e a e (e. . a *et al.* 2013). e c v e e e a - e ve - ec . e a a c e a c a e (40 70 %) a c e e (30 50 %) a e a e e (5 10 %) a cca a v e (. 3). cce e a c e e e a c . e e c a e a a ve c e a a e e a e c a e a e ca e a e a a - e a , e e ce e c a a c a e a e e a e e ev- e a - ec . e a a c a e c v ca c e - e a e e ce a ca v e e e e ev a a e e a ( ) a e a a a ( ) a e e ev a a e a a ( ) (a *et al.* 2006). e ea e ev a e e ce a e a e v ca c a c e e a a a a c ac e ev a a a. e a v e ee e e acc e c a ca , c c e a c a , v ca c a c c a - ea a e (. 2). e e e e, a a ca a e e c a ve a a c a e c ava a e ve , a e ca c- a ea e a ea . a a c a e c ava e a ee ec e a a e e e a e a e eca e e c e a a e a- (a , 1 3). e ev a



e 2. (e) e ca a e a e a e c e (e a e *et al.* 2007, 200 *a* a a , 1 3).



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

a a e v ca c e e a a a a e - e ve a e c e e e.

3. Analytical procedures

3.a. Zircon U–Pb dating and Hf–O isotope analyses

c e e e a a e a a a e (2013 01, 46° 32′ 51 , 8 ° 2′ 4) a a a e (2013 02, 46° 33′ 2 , 8 ° 2′ 36) c ec- e e a e e e e e e . c e a a a ca e c ve a a e c a e ec e . c a e e e a - c e e a c a c c e. c a a c e e e ce a a e e e e , c e e e e ec e c a a a . c e e c e e a e a e ec e c a a e a ca e ce ce ( ) a e evea e e a c e . c a e a e c - e e a a e e a e a a c - ve c e a a a ec e (- -) e a e a e e a e a e ce , e e e ca ve . e e a e a a ca ce e ave ee c e e e *et al.* (2011). e e e a a e e a e a e e a a e . a a e c a e e - e - a a a (*et al.* 2010) a (, 2003). e e e ea a e a e e a e 5 % c e ce eve . c a e a a a e c 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 ec ve , ava - a e a .// a .ca e. / e .

c e e e e ea e e a eca 1280 a e e e a e c , e e ca e c e ce e , a a ca ce e a e e e *et al.* (2010*a*). ea e ^{18} /^{16} a e e a e e a a a ea cea a e c (, ^{18} /^{16} = 0.0020052), a e c ec e e e a a ac - a ac ( ) e a c a a e e- e ce a a a δ^{18} va e 5.31 ‰ (*et al.* 2010*b*). e ea e e e c a - a e c e e a e e ea δ^{18} 5.44 ± 0.21 ‰ (2), c c - e e e e e va e 5.4 ± 0.2 ‰ (*et al.* 2013). c e c a a a e e e e e a a e a a e 3 ava a e a .// a .ca e. / e .

3.b. Mineral analyses

e a c e e e e e e - ec a a a e 8800 e ec- c e e e ve ave e ec e e a e a e e c e - , e e ca e c e ce . e a c - e e 15 e acce e a v a e a 15 ea c e 20 c e. e e e - a ve e a ca a a a e e e - e e a a e a a e 4 a 5 ava a e a .// a .ca e. / e .

3.c. Whole-rock analyses

e- c a - a ace-e e e c e e a a e a e a e e c e - , e e ca e c e ce . a e e e e e a a e a a 100e - e a a ca ce e e c e *et al.* (2004). a ca ec e e a e e a 2 %. ace e e e e e a a e a e - e c e 6000 - ce - e e c e *et al.* (2004). 50 a e e eac a e e e ve - e e e a + $_3$ - e. e a a a c a e e e e a e a c . e a a -1, -2 a -2, a e e e a a a a -1 a - 3, e e e ca a e e e c ce a ea e a e . - a a ca ec e e e a e e a 3 5 %. e a a ca e a e e a e 1.

a e c ea e e e e e a ve e + $_3$ ac , a e e a a e c ve a ca - e c a e ec e . e c ea e e e e e e a c a e -c ec c ve c e a a a ec e e (- -) a e a e e a a e e- e c e , e e c e , e e ca e c e ce . e e a e ce e a ee e c e *et al.* (2004). e ea e ^{87} /^{86} a ^{143} /^{144} a a e c ec e ^{86} /^{88} = 0.11 4 a ^{146} /^{144} = 0.721 , e ec ve . e ea e ^{87} /^{86} ave a e a e e 0.710288 e 87 a a a 0.70506 -1, a e ^{143} /^{144} ave a e a e e 0.512104 - 1 a 0.512671 -1. e a a ca e a ca c a e a a e e a e e a e 2.

4. Analytical results

4.a. Zircon U–Pb ages

c e a a e a e a ce a c e . a a e a c e a 100 150 µ a a ec a a 1.1 2.1. a e , e c a e c a , ea e c a ac e c - c a c a a c c (ee e . 4a). a a e e e c c e a e, a e e va a e (22 123) a (8 57) c e / a a 0.4 0.8. e - eve a a e 30 c e e c e e a c c a a e a a - ca e a a e e ea a e 485.8 ± 2.5 a a e 1. e c e ca c e e e e, c a e a a a e a e a e c e

a e c e	2013 01-1	2013 01-3	20132 01-4	2013 01-5	2013 01-6	2013 01-7	2013 01-8	2013 01 1	2013 01 2	2013 01 4
					Major elements (%)					
$_2$	38.70	48.20	3 .41	38.62	3 .22	3 .82	3 .05	47.22	46.48	51.27
$_2$	0.05	0.20	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.14	0.12	0.27
$_2$ $_3$	0.61	1. 6	1.04	0.67	0. 0	0.74	0. 0	18.28	1 .64	1 .33
e$_2$ $_3$	8.44	4.68	7.87	.36	7.57	7.16	7.84	3.67	3.24	3.8
	0.08	0.10	0.11	0.11	0.11	0.0	0.11	0.08	0.07	0.08
	38.21	24.5	38.82	37.8	3 .0	3 .31	38.44	10.04	.03	5.8

a e 1. e

a e c e	2013 01-1	2013 01-3	20132 01-4	2013 01-5	2013 01-6	2013 01-7	2013 01-8	2013 01 1	2013 01 2	2013 01 4
	0.005	0.064	0.008	0.005	0.00	0.003	0.003	0.051	0.044	0.222
	0.021	0.347	0.044	0.042	0.072	0.031	0.033	0.310	0.257	1.450
	0.004	0.047	0.007	0.008	0.011	0.005	0.005	0.04	0.043	0.21
	0.011	0.232	0.036	0.044	0.012	0.034	0.008	0.123	0.0 0	0. 3
a	0.0 0	0.036	0.038	0.037	0.068	0.026	0.025	0.046	0.031	0.067
	0.268	1.710	6.600	1.880	0. 3	0.233	1.150	1.570	0.516	0.1 5
	0.406	0.0 2	0.127	0.112	0.0	0.1	0.054	0.168	0.1 1	0.6 5
	0.046	0.034	0.014	0.028	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	0.07	0.066	0.042	0.073
a e c e	2013 01 5	2013 01 6	2013 01 7 (1)	2013 01 8 (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 .17	45.87	48.7	53.1	51. 1	50.40	50.54	50.52	51.22	52.37
2	0.34	0.15	1.40	1.24	1.31	1.70	1.63	1.31	1.17	0.33
2 3	18.	1 .58	16.5	16.1	15. 3	15.87	16.76	15.55	15.48	1 .61
e2 3	4.52	3.34	7.88	7.11	7.43	.0	.50	.42	7.82	3.44
	0.0	0.08	0.11	0.10	0.11	0.13	0.11	0.14	0.12	0.07
	6.87	7.42	4.80	4.28	4.41	5.8	3.2	6.06	7.14	4.88
a	11.03	12.61	6.22	5.75	6.3	6.75	4.52	7.4	8.26	8. 0
a2	4.86	7.38	8.72	8.3	8.00	4.52	7.31	4.80	4.08	7.11
2	0.13	0.11	0.3	0.31	0.42	2.04	0.33	1.27	2.03	0.17
2 5	0.04	0.02	0.62	0.62	0.65	0.74	0.6	0.47	0.44	0.04
	3.72	3.26	4.24	2.54	2. 3	2.27	5.14	2.65	1. 3	2.7
	.75	.82	.76	.70	.4	.40	.81	.67	.68	.71
	4. 8	7.4	.11	8.70	8.42	6.56	7.64	6.07	6.11	7.2
#	75	81	55	54	54	56	41	56	64	74
					Trace elements (ppm)					
	.0	4. 5	1.16	1.12	1.47	.08	40.4	5.2	6.82	5.71
e	0.22	0.135	1.284	1.683	1.316	1. 53	1.034	1.100	0.575	0.62
c	25.0	23.8	18.6	17.5	17.5	7.5	1 .2	25.2	18.	17.0
	118	83.7	186	166	172	227	22	254	187	75.7
	34.7	163	60.5	62.6	64.1	116	18.	0.7	203	23.7
	24.2	21.6	26.	23.6	24.6	27.8	28.5	28.0	28.0	16.4
	4.7	175	63.6	50.7	51.4	76.8	27.7	57.3	132	71.1

a e 1. e

a e c e	2013 01 5	2013 01 6	2013 01 7 (1)	2013 01 8 (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. 7	1.20	3 .60	46.70	47.30	23.40	43.00	25.20	32. 0	6.56

a e 1. e

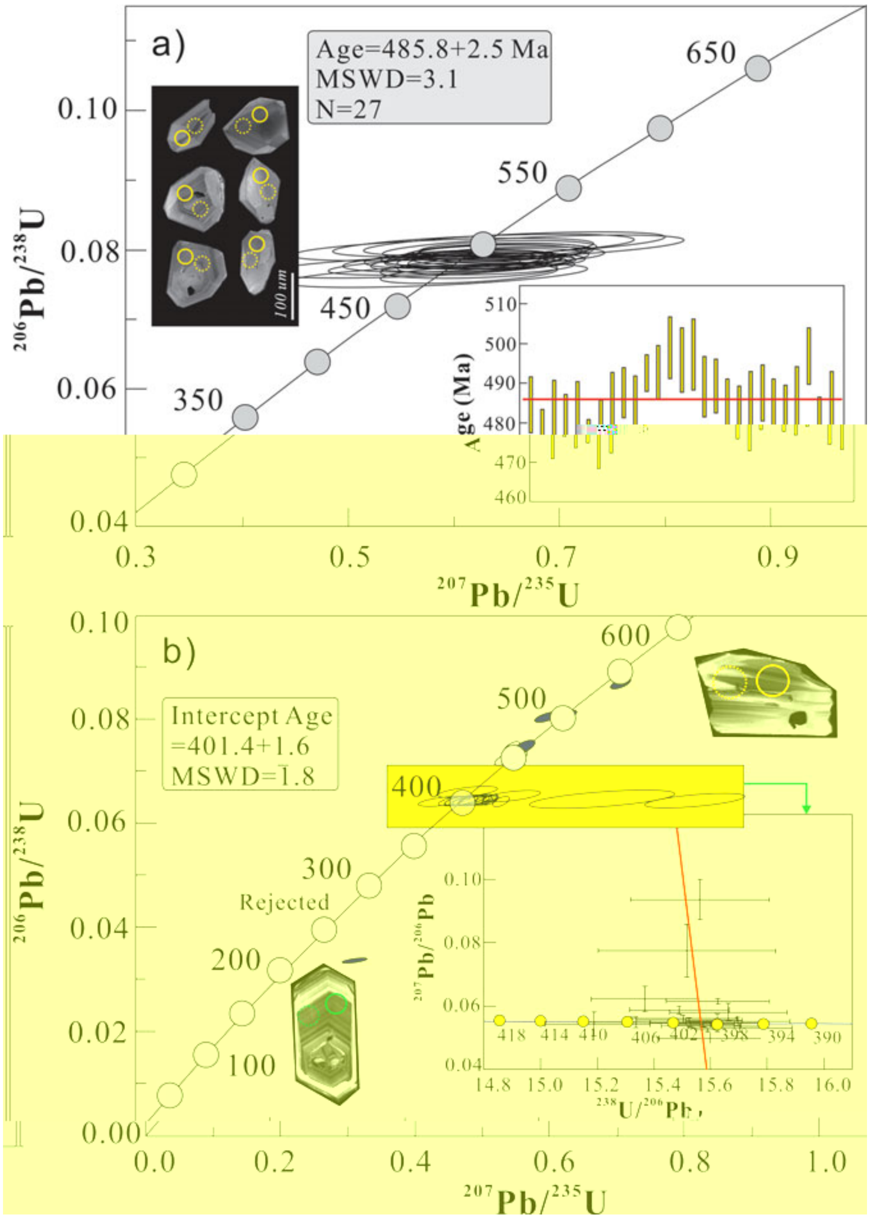
a e c e	2013 01 11 (2)	2013 02 1 (2)	2013 02 2 (2)	2013 03 1 (1)	2013 03 6 (1)	2013 01 10 (2)	04 06 (1)	04 24 (1)	04 2 (1)	03 1▼ (1)
Trace elements (ppm)										
	1 .4	36.	42.4	26.0	32.4	1▼.	/	/	/	/
e	0.3 5	0.153	0.358	1.1 8	0. 4▼	0.468	/	/	/	/
c	32.5	33.2	34.5	25.1	26.3	32.1	13.4	20.5	1▼.▼	20.3
	1 4	203	21▼	33▼	341	1 5	144	184	214	265
	56.5	44.2	4▼.8	1 .8	22.2	53.8	158	162	214	265
	34.▼	3▼.5	38.3	23.1	24.8	33.8	20.6	30.	28.	20.2
	66.4	84.6	▼6.4	25.4	2▼.1	66.6	8 .1	114	▼5.5	▼.02
	6.4	236.4	256.▼	205.4	208.	114.20	/	/	/	/
	48.0	44.1	4 .0	4.	103	44.1	/	/	/	/
a	12.0	11.1	11.2	14.▼	13.6	12.0	/	/	/	/
	0.58	1.420	1.0▼0	3.130	3.2▼0	0.583	4.	18.1	22.0	1▼.2
	▼1	1▼50	5	2▼0	24	686	▼1	831	1118	▼▼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	52.8	243	133	164	151
	1.2	0.84▼	0.855	11.315	11. 85	1.25▼	20.2	12.▼	21.	12.2
	0.025	0.030	0.02▼	0.051	0.052	0.028	/	/	/	/
	0.381	0.286	0.328	1.560	1.450	0.360	/	/	/	/
	0.288	1.▼20	1.030	0.365	0.406	0.336	/	/	/	/
a	11▼	3▼2	346	825	50▼	84.3	/	/	/	/
a	10.▼0	▼.840	▼.610	26.40	26.80	10.50	30.6	32.2	40.1	26.4
e	23.00	18. 0	18.40	51.50	54.▼0	22.30	5▼.8	62.	82.3	52.5
	2.▼▼0	2.520	2.510	5.▼50	6.180	2.6▼0	6. ▼	▼.84	10.5	6.4
	11.80	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	5.28	6.8	4.85
	0.8 6	0. 18	0. ▼0	1.163	1.25▼	0.883	1.45	1.58	2.0▼	1.03
	2.480	2.813	2.▼54	4.14	4.46	2.522	3.56	4.01	5.35	4.23
	0.3 6	0.38	0.3 ▼	0.612	0.660	0.384	0.4	0.54	0.64	0.63
	2.180	2.150	2.220	3.420	3.680	2.130	2.5▼	2.▼▼	3.24	3.▼5
	0.468	0.446	0.444	0.▼28	0.▼5	0.468	0.4	0.52	0.5	0.▼8
	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	0.328	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	0.084	0.062	0.051	0.5 ▼	0.644	0.0▼	1.35	0.68	1.16	0.68
	0.151	2.0	1.50	2.▼5	1.88	0.33	/	/	/	/
	0.3 4	0.206	0.200	45.20	35.10	0.41▼	8.13	8.0▼	4.18	21.06
	1. 0	0.▼61	0.▼1▼	8.860	.2 0	1. 80	4.50	2.63	3.20	.41
	0.500	0.304	0.302	2.830	3.480	0.501	1.▼	0.6▼	1.46	2.5

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

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

a e	c e	( )	( )	$^{87}/^{86}$	$^{87}/^{86}$ (1σ)	($^{87}/^{86}$)	( )	( )	$^{147}/^{144}$	$^{143}/^{144}$ (1σ)	($^{143}/^{144}$)	ε (*t*)
2013 01 3	a a (2)	0.36	3 2	0.0027	0.704030(2)	0.704015	2.4	10.8	0.13 4	0.51283 (40)	0.512474	6.
2013 01 10	a a (2)	0.58	686	0.0024	0.70475 (23)	0.704745	2.37	11.6	0.1235	0.51280 (43)	0.512486	7.1
2013 03 1	a a (1)	3.13	270	0.0335	0.706324(20)	0.706133	4.4	22.3	0.1217	0.512533(47)	0.512214	1.8
2013 03 2	a a (1)	2.87	1320	0.0063	0.70428 (20)	0.704255	4. 5	28.6	0.1046	0.51271 (51)	0.512445	6.3
2013 03 3	a a (1)	8.06	516	0.0452	0.705368(43)	0.705111	5. 7	36.	0.0 78	0.512707(30)	0.512450	6.4
2013 03 4	a a (1)	.65	1480	0.018	0.704227(51)	0.704120	4.55	24.5	0.1123	0.512803(53)	0.51250	7.5

ε (*t*) = 10 000((^{143} /^{144}) (*t*)/(^{143} /^{144}) (*t*)−1), ε (*t*) a (^{87} /^{86}) va e e a a e a e a a ea a e eca c a e e a e 401 a.



e 4. (e) c a a a c e a e a e a e a e ev a .
e e a e a 1σ a a e ce a e a 2σ (ea) eve .

(. 4a, = 27, = 3.1). a e c - e / a 1 3. cc a e ea-
e a ev e e 48 ± 4 a c e , e c a ca e v e .
a e e a e e a e 1 (1) c , acc a 70% e
a e a e (a *et al.* 2003). a c , a e c a a a ,
c e a e a e a a e a a e c c a e a c a-
c e , a 100 200 μ e a . e e (2) e c a a

c a , a ea e c c - a e c c a a (2, ee e . 4). e - e a a e e e e e c e a e. e e, e e 2 c e e e a e a 450 a 500 a a a e e e e c . e e 21 a a e e e e 1 c e c - e ^{206} ^{238} a e a e e ea a e 401 ± 2 a (= 3.3). e c a ce e ee ^{206} ^{238} a e a ^{207} ^{235} a e , e e a- a e ve e c a a a e a e e ce a e 401.4 ± 1.6 a (= 1.8) (ee e . 4), c c c e e ^{206} ^{238} e e ea a e. a e c e e e ca a e (a , 1 3).

4.b. Mineral compositions

4.b.1. Spinel composition

cce c a e cc e e e e (. 3). a a e 100 300 µ ac . e a a ca e (e e e a a e a a e 4 ava a ea .// a .ca e. / e) a e e ave 2 3, e a 2 3 c - e , va a e , a a 2 c e . e e a c e a e e a e a e c a e . (100 /(+)) a 44 60 a . (100 /(+ e)) 25 61. e c a va a c e e e a e a e e / c e ac a / - a a c ce (*et al.* 2010). e eve ace e e e e e ve e ac - ca e e e ec ( ) a e e e e ac e e e e ace e e a e e e (a *et al.* 2013).

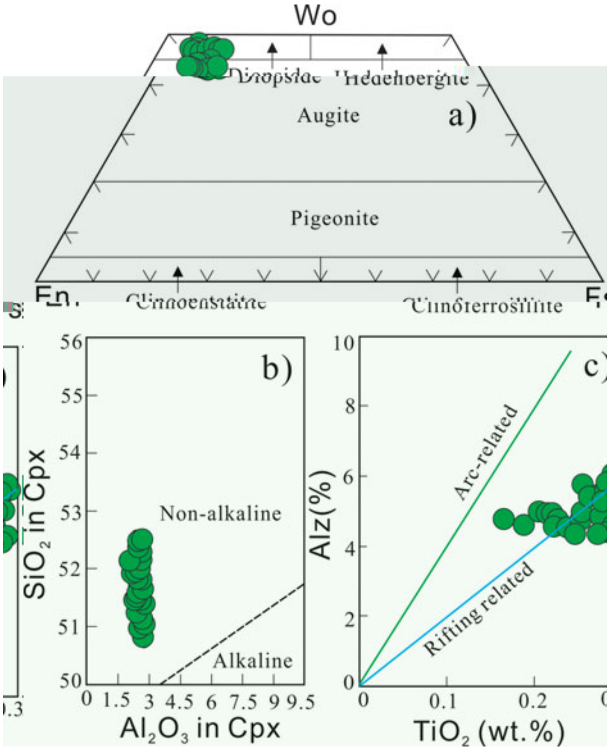
4.b.2. Pyroxene compositions

e e e e a e a a a a e e e c (= 84 86). e c e e ave ve 2 c - e (e a 0.5 %) a e c e ca c - a e a a e (e e- e a a e a a e 5 ava a ea .// a . ca e. / e). e c e e e c - a e ave c e c e ca c 41 4 . , 46 55 . a 1 7 . (. 5a). e -a a e - e a e ea e acc e 2 3, 2 a 2 c e (. 5 , c).

4.c. Whole-rock elemental geochemistry

4.c.1. Serpentinites and cumulates

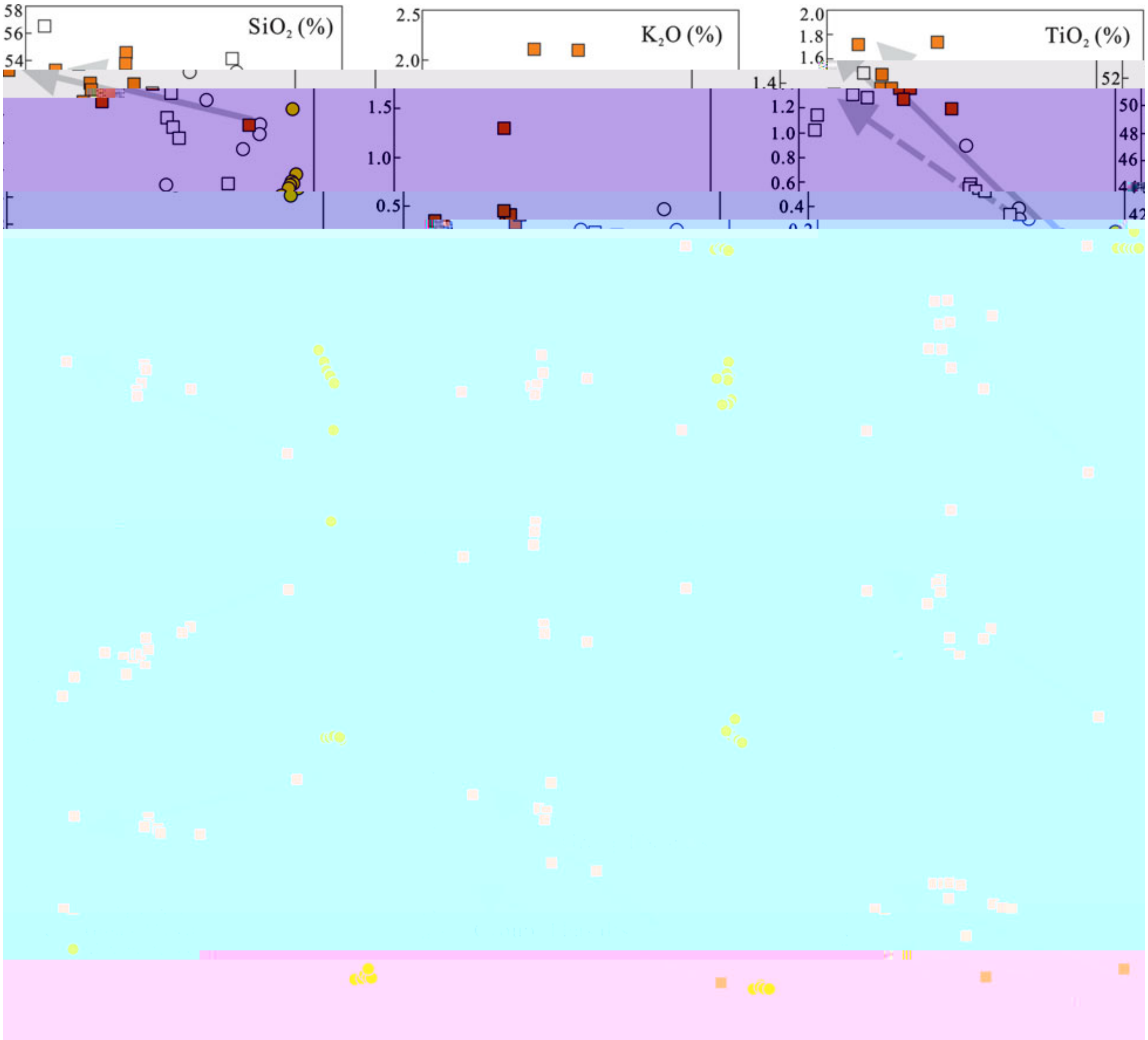
e e e e ave ve ( ) (> 12 %, c c e e e ve e e - a) a 2 (e a 40 %), 2 3 (e a 1.0 %), 2 (0.03 0.06 %), a2 (0.04 0. 2 %) a 2 (0.04 0.05 %). a e2 3 c -



e 5. (e) (a) a a e c e c e e a e a e a e. ( ) 2 (%) v. 2 3 (%) a (c) (e ce a e e a e a e cc e) v. 2 (%) c e e a e a e a e.

e e a 8 1 (a e 1). e a e a a , ca c e a e ee . e a e e e e ve (. 6). e ave e a ve (3 103) a c e (5 8) (a e 1). e (> 12 %) a a2 , 2 a a c e e c- a e a a e a c a e e e a c e e a e e e (a, a a) a e a e a e e e e e ( ) (e. . , a a). eve , ce e e a e c e - a , 2 3, e2 3 a 2, e e a e e a ca e e e e- e e e a a e a . , e e e e e ca e e e c e - e e . e e e e ave ve a a e ea e e e ( ) a - e - e e e e ( ) c e (a e 1). eve , e c - e - a e c e- a e a e (. 7), a ea e a e e c e e (ea ce, 2014, e c e a e ve a e va e a e & c- , 1 8).

e a c c a e ave 2 a 45.87 % 51.27 %, a a va a e e2 3 (3.24 4.68 %), 2 3 (18.3 1 .6 %, e ce a e 2013 01-3), a (.54 15.42 %), 2 (0.12 0.34 %), a2 (2. 1 7.38 %, e ce a e 2013 01-3) a 2 (0.11 0.46 %) c - a ac a a / c a e ec (a e 1).

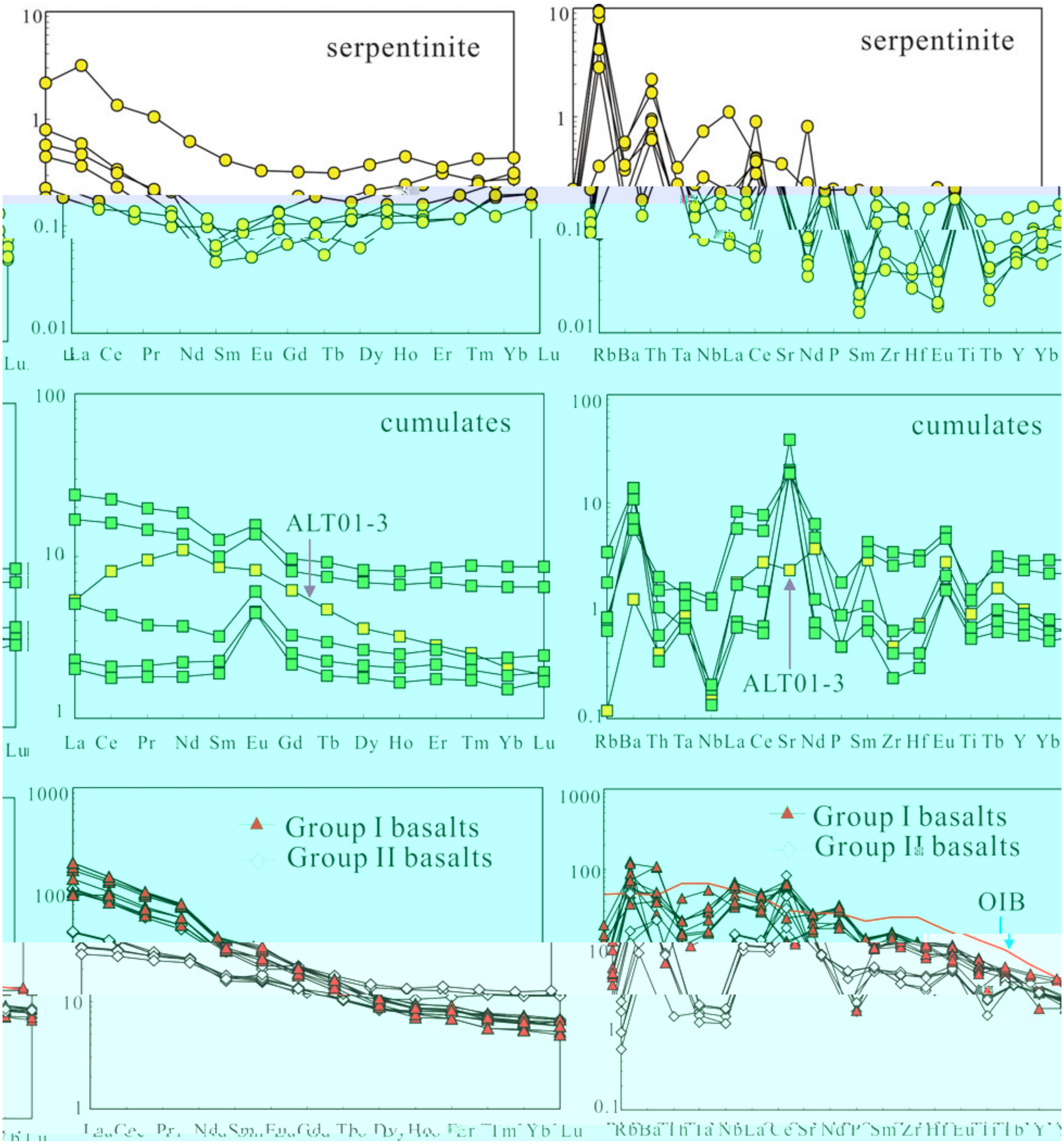


e 6. (e) a e va a a a e a a a e a e (. v. 2, a2 , 2 , 2, e2 3 , 2 3, a , , a) (a e e e *et al.* 200 a a e a c e e a e e e).

ca c e a e ee . a a- e e e a e ve e a e a a (. 6). e c a e ave va a e a c - e a 5 41 , a a c - e c e- a e a e ( ) e c e ((a/) = 1.3 2.8) a ce ve a a e (/ = 1.1 2.2). a e 2013 01-3 a e a e , e e e ee ec . e e e a e e ve e - ec . e ve- a e ( ) a e c a e e e e a- a (. 7), a e c a e a e c a ac e e ca e a ve a a e (/ a = 0.2 0.4) a va a e ve a a e a, a .

4.c.2. Basalts

e a a a a e c a a ave 2 a 43.15 % 57.65 % (e a 52 %, a e 1). va a e e a a e a , e c a e e e e e e e c a ca . e / v. / 2 a a , e a a ca e v 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 c a - e e (. 8a). 1 a 2 e a e c e e e / v. 2 a a (. 8). e a e a a , 2, e2 3 , 2 5, 2, , a c ea e e a a 2 3 ec ea e ec ea . e 1 a a . e 2 a a , 2 5, 2, a c ea e ecea . (. 6). e 1 a a ave e a ve a c - e a 124 205 e e 2 a a ave 50 60 a . 1 a a ave e eva e (a/) e ee 10 a 30 (a ve 20) a e a e e a ve

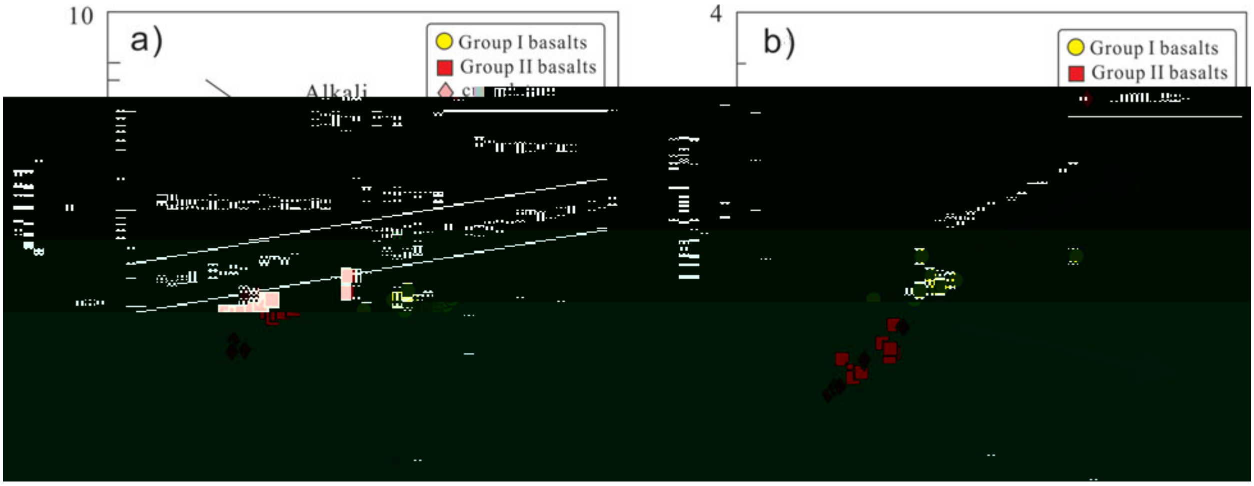


e7. (e) e- a e a e a ve a e- a e c a e ace-e e e - e e e a a e e e ea a e a e a ea e ev a a a . e a a va e a e & c (1 8).

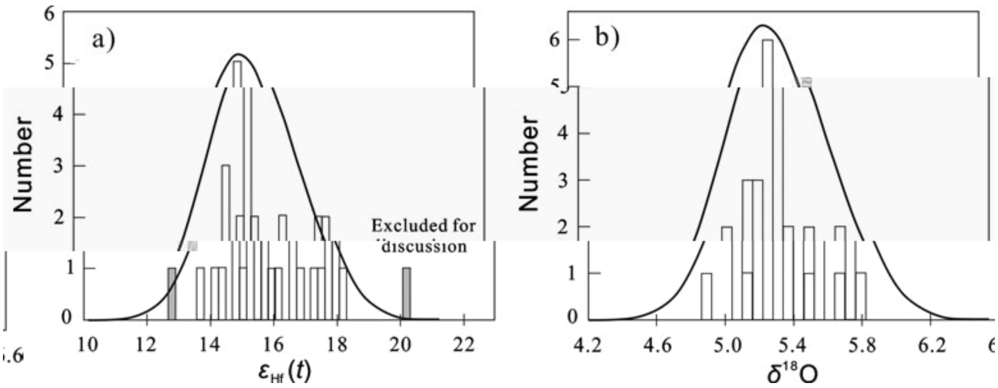
ve a a e (/ = 0.70 1.14) (. 7). e 2 a a ave e a ve a a- e (a/) a 4 6 a ve a a e (/ = 1.02 1.21) (. 7). e - a e -e e e a a , e 1 a a e a e va a e e a- ve a a a e / a a 0.44 0.87, a e a ve ve a a e c - e e a a e . e 2 a a ave e c a e e e e c e a e e 1 a a a a ce e a ve a a- a e ve / a a (~0.11). e e ea e e e e e ca a c a a (. 7).

4. . Whole-rock Sr–N an z rcon Hf–O sotopes

a e c c e e e e a ve a a a e e a e 2. 1 a a a 2 a a ave a c c - . e a a a e ^{87} /^{86} a- (0.0024 0.0452) a ^{87} /^{86} a (0.704030 0.705368), c e e a ve e e a ^{87} /^{86} a (0.704015 0.705111, e ce 2013 03 1). e ave ^{147} /^{144} a e ee 0.0 78 a 0.13 4 a ^{143} /^{144} a e ee 0.512707 a 0.51283 a ea c a ε (t) va- e +6.3 +7.5 (e ce 2013 03 1 a +1.8).



e 8. (e) (a) c a e e e e (/ $_2$ v. /) c a ca a a e ev a a a a a (c e e & , 1 ▾▾). ( ) e- c $_2$ v. e / c a e ee e ca c-a a e a e c e e . e ca c-a a e a e c e a e a e a (1 ▾4).



e . (a) c ε (t) a ( ) e ec a e a e a e a e.

c e c e c a e a e (2013 01) c e e (- e e e a a e a a e 2 ava a e a . // a .ca e. / e , . a), ε (= 485 a) a 13 20. e e a e a e 285 a 588 a. e e ε (t) (> 16) a e a e a e e a e c a a a e ea , a e e a e e c e e c . e a ε (t), e a a e ea a a a ea a 15.▾. e ea - e δ^{18} va e a e 4. 1 ‰ 5.▾3 ‰, a a a a (.). , e e c ave e e e c c - a ea δ^{18} $_c$ va e 5.3▾ ± 0.23 ‰ (.).

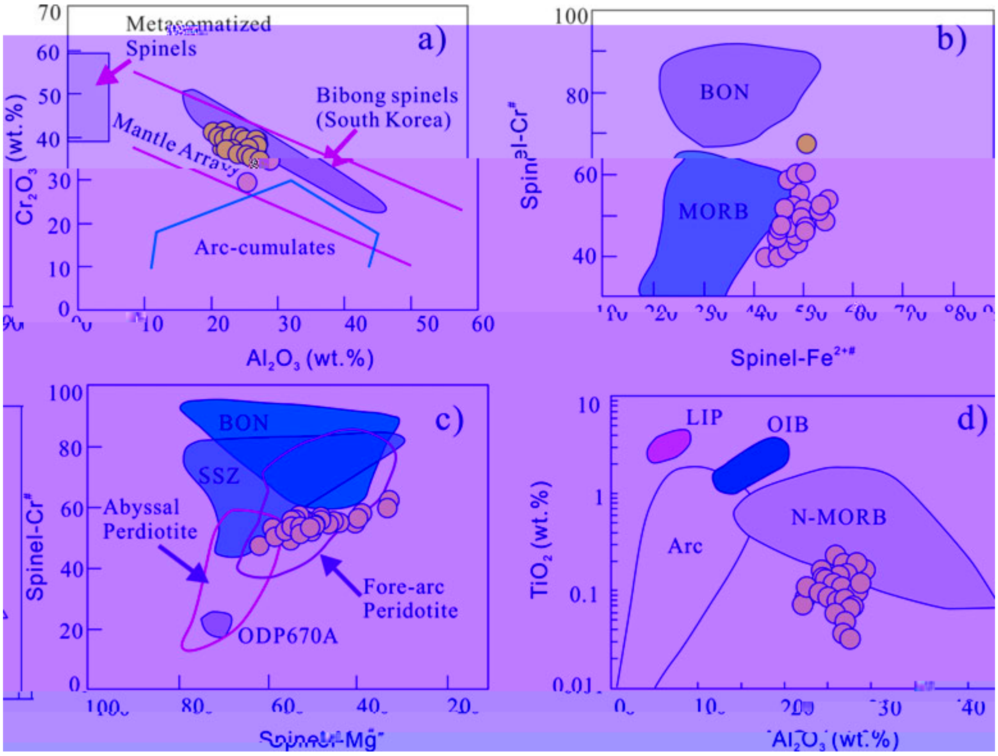
c ~400 a e a e ave a a e a e ε (t) va e e ee 1.4 a .2 e- a e e a e a 680 a 20 a. e e c ave va a e - e c a e ea e e a a e c e a e (et al. 2008).

5. Discussion

5.a. The individual members of the Zhaheba ophiolite

cc e c a e e c a e a e v ca c c , e c a e a e ev - a ava e e e ace a e e a c. 486 a a 401 a, e ec ve . e a e e c a e a c e e ev e e a e (503 ± ▾ a) e a a e e - ea e ec e a e a e a e a e (416 ± 3 a) e e a e e e a e a a a e c e (a et al. 2012, a et al. 200 b, . 1). e v ca c e- e ce (401 a) a e c a e (486 a) (c - e e e e) a e c ea a c . , e e a e v ca c e e ce a e a e - e e a e a e. e ev a a e c e e c a e e v ca c e e ce (a , 1 3).

cc e a e e e ea e a a e e e e a e a e (. 1), e e ca e v e ee a e , .e. e a a a e a a c

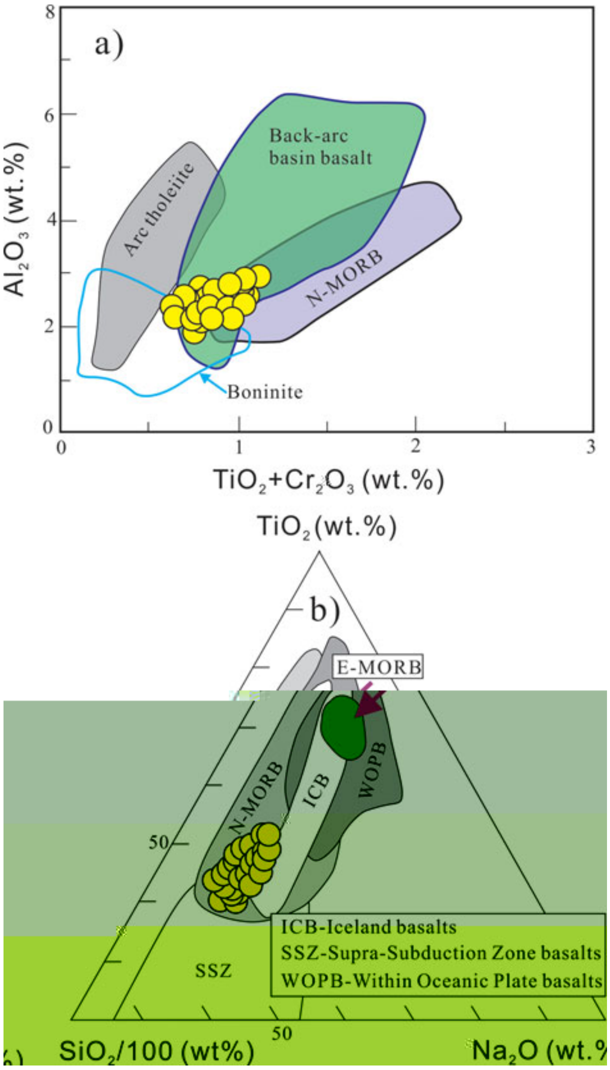


e 10. (e) c a e c a a a . (a) $_2$ $_3$ ve $_2$ $_3$ (%) a a (a e a & , 2000). ( ) . (100 /(+)) ve e^{2+} . (100 e^{2+}/(e^{2+} +)) e e a e a e (a e a , 1 4, a e & e e , 2001). (c) . (100 /(+)) ve . (100 /(+ e)) e e a e a e (a e e *et al.* 1 5). ( ) $_2$ ve $_2$ $_3$ c a e a e e a e a e (a e a e , a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

a e (500 480 a) (a *et al.* 2003, *et al.* 2015,), e ev a e a e c a e (430 400 a) (a *et al.* 200 *b*, 2014 a e e e ce e e) a e a e e c - e (3 0 350 a) (a *et al.* 2003, *et al.* 2006).

5.b. Origin of the serpentinite and cumulates

e a a c c ave c e a - e e ve a a e a e e e c a ec c ca a e a v ve a e e a (e e a , & e, 2002, *et al.* 2010



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

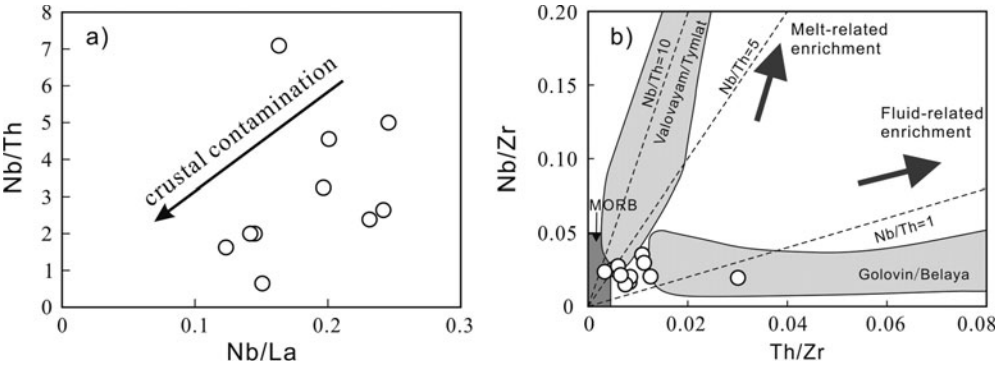
c e a c c a e c a e a c a a e ve e ee a e ce (- e). e e ea e a e a e c a e c a e a a a e e e- ve e e e a e e c a e ce , a e a c ee - e - e c e e . e e a , a e 5c, e c e e e c a e e - - e a e e . e $_2$ $_3$ v. $_2$ + $_2$ $_3$ a a , a e a a e c e e e ve a a ea e ee - a ac -a c a a a (. 11a). e $_2$/100 $_2$ a$_2$ a- a , c e e e ve a e ee e - e a - e (. 11). e a e a c c - a e ave ca a e - a e a a a e a e e e c e (. 7). e e a e e . e c a c a a , a c a a e

e e . eve , e e c e a e ee / a a / a (. 12a), c e ca c a c a a . e ve , e e- a e e a e a e c a a a e e a . e e a e a e ce e e c - e a e e a a . eve , e / a / a a e a a e e e e - e a e e a- a e (. 12). e e e, e ca a e a ve a a e e c e e a e ece a e a e c - e a e e a - a . *et al.* (2002) ave e a e - ca a e a ve a a e e a e e a e a e c e e c a e e c e e a (c a a e e e e). , e e- ce a e a e e e a c a e a e cea e e e c e c a c a a c - e a e e a a .

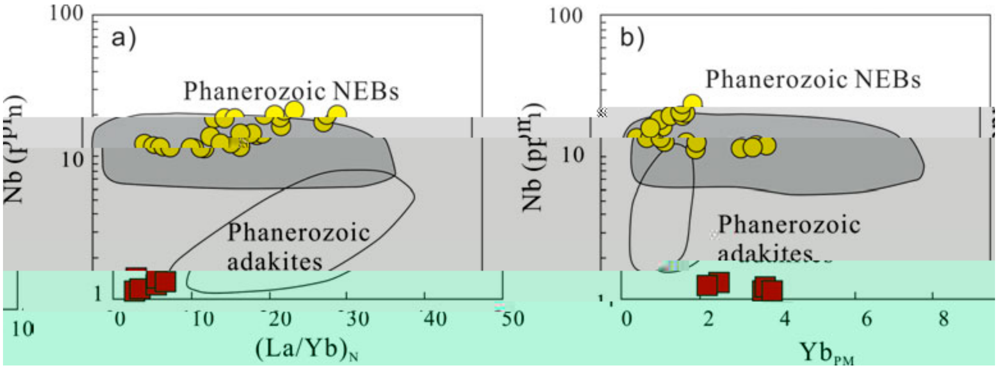
5.c. Petrogenesis of the Devonian basalts

cc e e c e , e a a a e v e , .e. a a e 1 a e c ca c- a a e 2. 1 a a ave (11 24 , a ve 15), $_2$ $_5$ (0.4 0.6 %) a / a- (11 15, e 60) a va a e (a/) a va e , e e a e - c a a ( ) (e a , ac & , 1 2, - a & e c , 2001) (. 13). a e a ve a e ce ave ee e acc e a c ve e c e ca ea e . (1) a a e e c e a e c e cc e a e e e (e. . a , & - a a , 2002), (2) a a e e e c a e a - a e a a e (e a , ac & , 1 2, e a & , 1 3, a a *et al.* 1 6). e a e ec a e a e a a e e e e e e 1 a a .

ev e e a e a a e e ve a ce c e - ee c e a e (a , & , 2007, a e *et al.* 2011). eve , e 1 ave a ^{87} /^{86} va e (0.704120 0.706133) a ε (*t*) va e (+1.8 +7.5). e a e e e e c e . a , e ave e / (3.44 20.4) a e a/ (1.51 2.54) a a (e. . e & a , 1 86). e e e, e e c a ac e - c e a a e ce. e a ve , e e a e 1 a e e ve a a e e e ea a e a a e- e e e ve a ce a (a a *et al.* 1 6, e e , 1 6). a e e e a e a a e c . e e e e e a - e , e ea e eac e a e e e e e a e a -e c e ce (& e c , 2000). e e e a a a e a a e e e e e a e (e a , ac & , 1 2, a a *et al.* 1 6). a *et al.* (2008) e e ev a a a e a e e



e 12. (a) / v. / a a a e c a c a a a ( ) / v. / a a e a c a e e a e a e.



e 13. (e) (a) (a/) a ( ) v. a a e a a e a e a a ea, ca a 1 a a ave ea e -e c e a a ( ).

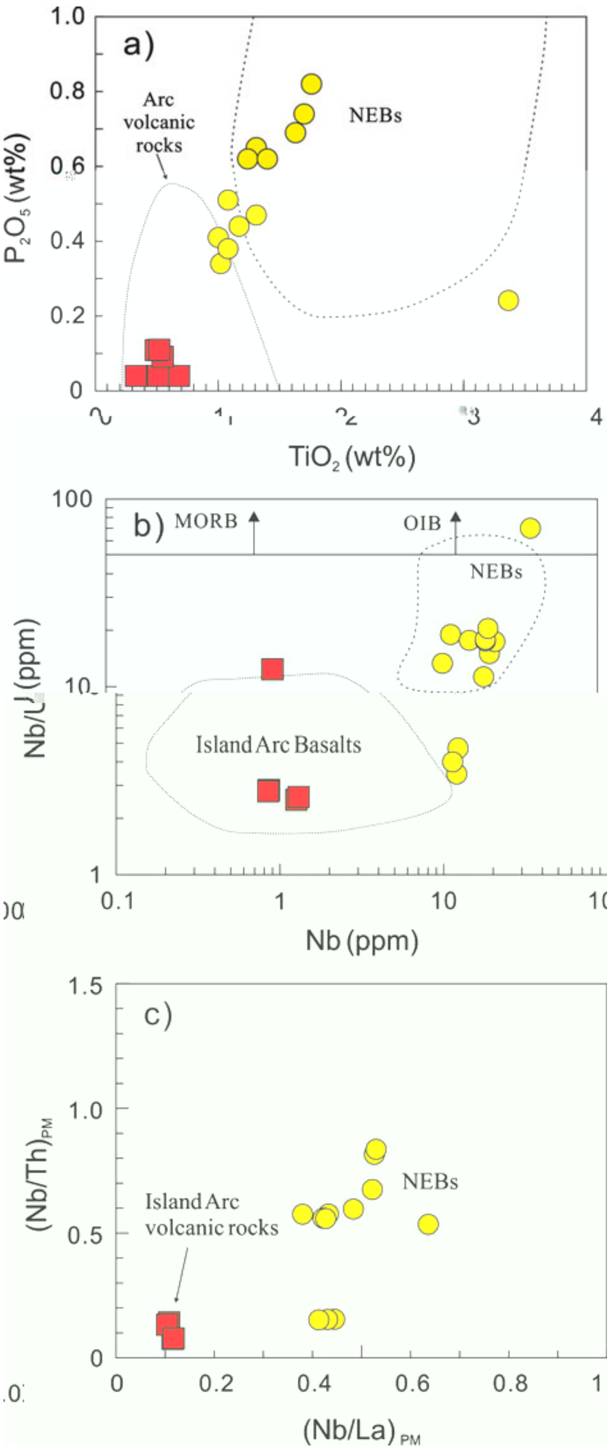
a e a . e 1 ave va ε (*t*) (1.8 7.5) a (^{87} /^{86}) (0.704120 0.706133) va e , c ca e a e ce a c - a e e e e (a e 2). e e a ve ε (*t*) va e a (^{87} /^{86}) a ca e a e e e a a c a a e a . c e ca a e - a e a a . , e 1 a a e a e a a ea e e e e ve a a e a a e e e ev e a a e a a c e e ea e a c e a . e a e e e ca a a c a a e a .

e 2 a a ave c e a e a - ve $_2$, a e c e , a / a (< 0.3), / a e / a (. 8), e ec e e a a a e ce e a - e ea e a / e e ve a a e e c e a (a e , & a e , 1 1, e , 2002). ce a a e ea e a c a a . e e a , e 2 a a ave (/) (0.7 1.0), (a/ a) (0.1 0.2) a / (0.6 1.0) a , ca e a e ce e 2 a a a a e a- a e e a e cea c c c- (a & c , 1 6). a e e 1 , e 2 a a ave $_2$ $_5$ c e a / a (/) a (a e 1, . 14). e a e e ca a a c v ca c c (. 14). , e 2 a a e ve a a e a a e e e ev e a a e e ea e a c e a . e e , e 1 a 2 a a a e e e e eac e . e e e va ca e a e a e a c - ec c e , c c e e e e e .

5. . Implications for the Palaeozoic accretion process in eastern Junggar

e e a e ee c 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 (503 485 a, a *et al.* 2003, *et al.* 2015,) a e e (400 a) (. 1). cc e e a c e a e c e e - a a a e a e e (*et al.* 2014), e e e e - cea e a e a c - e a e e .

e e c e a e e va evea a e a a ev a v ca c e e a e e ce a e ea e a e e e - ve e ec c e , c a- cea c a c, ea , acc e a e e, - cea e a ee - ea c (*et al.* 2007, 200 *a*,*b*, a *et al.* 200 *a*). ev e a e ec c e a a ca e e e a a- cea c a a c (a *et al.* 200 *b*). cc e e e e a



e 14. (e) (a) $_2$ $_5$ ve $_2$ a a . ( ) / ve a a . (c) (/) ve (/ a) a- a . e a c v ca c c a -e c e a c a a ( ) a e e a , ac & (1 2) a c a *et al.* (1 5), e ec ve .

a e e c e , e a a c e e e e a e a a a e a e a a - cea e. , e c a e e ve a - e e c a ea a e a e a e - cea e.

ece , e *et al.* (2015) e e a ev a a a - e a c ve e e ace 400 380 a a e e a e a e . e e a , e a e e a a e e a 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.* 2008, 200 , a *et al.* 2012, e *et al.* 2015). e e a ca - e a e ea e , a e- c a c e e a e e a e e a e- ve a a e ve e c va a e v ve e a e c (e & a , 2002, a *et al.* 200). e ev a a a - e a c c a - e a e a e e e e a a c e a a a c a c a e e a e a e a a c a e e (e *et al.* 2015).

e e e e (ee ec 5.c), e - e c e 1 a a a e ca a c- a e 2 a a e a e a a ea e e e cea c a c a e a ea. e ec- c e c , a e e a e a c - e (1 , 15). *et al.* (200▾, 200 *b*) e - e a - e e e a , c a e e c c a e a e c c e e e a e a e c e . e, a - e e e a c c a e -e c e a a c e a ec c a e a e - e a e e e (*et al.* 2008).

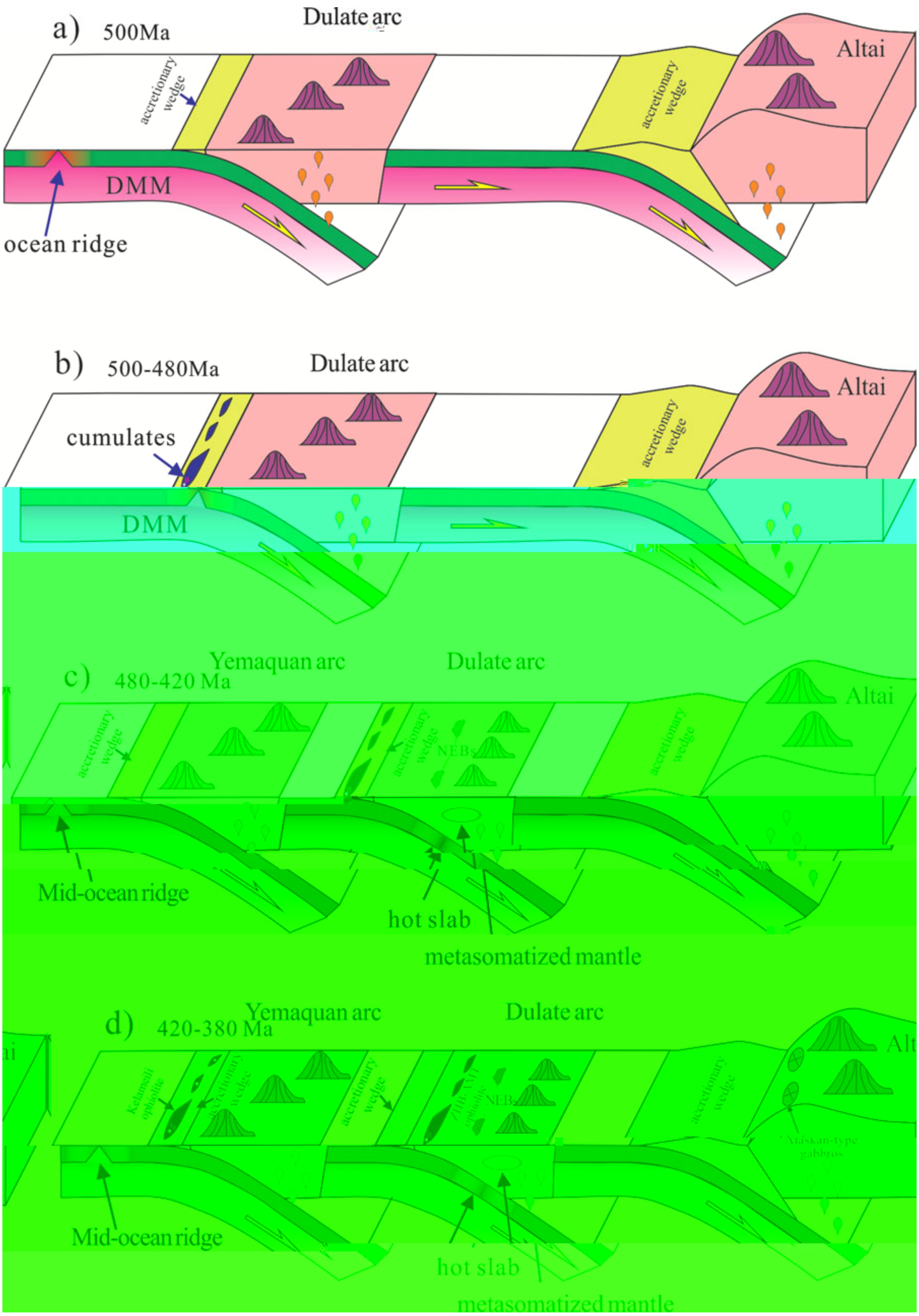
a ec c a e ave ee e e e e (e , e e e & e e , 1 1, a, - a & c , 200▾, a *et al.* 2013).

e c c e a ca e e ec c ev e ea e a e a e (. 15).

(1) a a e (*c.* 500 a), e a ae - a cea c e a e ea e e e a a c. e , a e a- cea c c e a a e a e a- cea c a c a acc e a e e e e e (. 15a). e a e e, e a c a e e a e , a eve a a c a a a ca ce a c- a e a e e e a e a e.

(2) a e a a ea v c a e (500 480 a), e e e a c a e e - cea e a e e-a c a e a e a a a e acc e e e acc e a e e (. 15). e, acc e a c e a a c-a c e e e a e e a - e a e a e c e a c .

(3) a e v c a a e (480 420 a), e - e (458 a, *et al.* 2015) e e a- cea c a c. e e - e a a c a e c a -e c e a a c ava (440 a, e *et al.* 2014) e e e . e - e c e a a e e e e a e a a e a a e a a e e e ev e a a e a a c e e ea e c e a (. 15c). e a e e, a e a- cea c - c e a e , a a e a- cea c a c a e .



e 15. (e) a a e a e e c e e ea e a a e acc e ce e a e a e.

(4) e ea e e e a e- a ev a e (420 380 a) (*et al.* 2014, a *et al.* 2015). e e e a- cea c c c e . , e 1 a a ( ) a 2 a a e e a a e a a e e e ev e a - a e e ea e a , c - a a a a c e , e ec ve (. 15). e a a - e a c c a - e a e cc e a ac e a a a c a c a e e a - e a e , a a c c- c e a e e ev a ea a e e (400 380 a). e e - a cea e c e e a e a - e e , eca 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 - ca - e c a a e e c e ca ea e a e e a e e a e e ce a e - c e a ac e .

6. Conclus ons

(1) e c a e e a e a e c a e a ~485 a, e e a a a ea e e a *c*. 400 a. , e a a e e ce a e c a e a e a c 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 c a a a c e ce a e .

(2) e c a e e ve a e e c a e a a e a e - e a e. e a a c e e e e a e a e e e e e a a e e e a e a a - cea e. e e a c e - e a e a e a a a e a - e.

(3) e a e a a a e acc e e e acc e a e e a e e a e e e e - ac e c- e . e ea e e a a e e a a- cea c acc e a e e e a cea . e ea e a a - ca a e c acc e a e c e c e , a ea , a- cea c a c a e ee - ea c .

Acknowle gements. - a e a - a ce e e . e ea a ec a e . a - a a ce c a e a - e a a e . e a e ve a e ea a . e a a e ve c c ve ev e a - ca ve e a a c . a c a e e a a 305 ec a (2011 06 03-01).

Supplementary mater al

ve e e a a e a a c e, ea e v .// . . /10.1017/ 0016756816000042.

References

, . 1 4. a ac e a e e e v e e c a e a . ev e a e e a . *Chemical Geology* **113**, 1 1 204.

, . . & , . . 2001. e a e e c e e a a c a a a c c . *Journal of Petrology* **42**, 227 302.

, . ., , . . & , . . 2007. e e e e e e c e v ca c a c . e c e ca ev e ce e c, e e . *Lithos* **97**, 271 88.

, . ., , . . & , . . 2002. e e e e e e c e e c, e e , ev e . *Geology* **30**, 707 10.

, . ., , ., , . ., , . ., , . . & , . . 200 . cc e - a e a . *Earth Accretionary Systems in Space and Time* (e . . a & . e), . 1 36. e ca c e , ec a ca . 318.

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

, . 1 3. e e a c a c a - e e . c cea c a ea , c e a a , a a c , ea e , a ea . *Geological Society of America Bulletin* **105**, 715 37.

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

, . . & , . . 1 3. . e e . e a e a e e a a e e c e e e a v ca c a c. *Geology* **21**, 547 50.

, . ., , . . & , . . 1 2. e e c e v ca e - e a a a a ea e a ca a ve - v e . *Journal of Geological Society, London* **149**, 56 7 .

, . . . & , . 1 84. a e a a e- e e c ca a a a a e- e e e a a a a c a e ava . *Contributions to Mineralogy and Petrology* **86**, 54 76.

, . & , . . . 2003. c- e c - ac a ea c acc e (2). a e e a e e a a, , a a . *Ophiolites in Earth History* (e . e & . .), . 43 68. e ca c e , ec a ca . 218.

, . & , . 2011. e e e a a ec c . e c e ca a ec c e a - c e cea c e e. *Geological Society of America Bulletin* **123**, 387 411.

, . ., , . ., , . ., , ., , . . & , . . 2015. e a e e c e a e a a a e, a a ec c ca ce . *Chinese Journal of Geology* **50**, 140 54 (e e a ac).

, . & , . 2000. e c v e e e e ea (- a c e a / a a e ea). ev e ce e e a a ec c ev e cea c - e e. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **140**, 283 5.

, ., , . . & , . 1 1. a a eve e e e a ec e , ce a - e a a e e . *Lithos* **27**, 25 77.

, . ., , . ., , . & , . . 2011. - c e a a ea - - - . *Geological Bulletin of China* **30**, 1508 13 (e e a ac).

, . ., , . ., , . ., , . . & , . . 2011. e c e a e - a a ava . a e e e ve a a e e e e ea- a e a e ? *Geochimica et Cosmochimica Acta* **75**, 504 72.

, ., , . ., , . . . & , . . 2001. e a a ace e e e a - ca e e e e e - cea - e e e . *Nature* **410**, 677 81.

, ., , . . & , . . 2002. a e e e ea a e e (c c cea). a a e e e c . *Chemical Geology* **182**, 227 35.

, . . & , . . 1 6. ce c a ac e- c e ve ve c a e ace e e e a a a a a a ea a a , a a ce c ec . *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)* **101**, 11831 .

, . & , . 2000. c ea ac a a - -e c e a a -a a ea c a . e 2.7 ac - e e a a e a e e c - c ee e e , e v ce. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **139**, 208 26.

, . , . ., , . ., , . & , . 2012. a a e ace e a e a a a e. - - c a e ev e ce e a a e a ea e a, a . *Geological Bulletin of China* **31**, 1267 78 (e e a ac).

, . ., , . ., , . ., , ., , . ., , . & , . . 2014. c ve - 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 c e a c e a e a e c. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences* **91**, 181 3.

, . . & , . . 1 0. a e ca e c e a a c c e a e , e a a . *Journal of Petrology* **31**, 67 71.

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

, . ., , . . & , . 2001. ac c c e a a c e. a e ca a c a e v e, - e a e c ve c . *Journal of Petrology* **42**, 655 71.

, . 1 6. a a e e- e e c c - e . *Nature* **380**, 237 40.

, ., , ., , ., , ., , . & , . 2000. a a c- ec c e ec e a e ea e e ac ve e c . e e e c e . *Tectonophysics* **326**, 255 68.

, . ., , . . ., , . ., , . ., , . & , . . 2010*a*. e e e a ec c ca ce e 850 a a a a a ec e a. ev e ce - c a e a e- c e c e . *Lithos* **114**, 1 15.

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

, . ., , . ., , . ., , ., , . ., , . ., , . ., , . ., , . . & , . 2010*b*. e a c e ac- . a e a e e e e ce c ea a a e a a e. *Geostandards and Geoanalytical Research* **34**, 117 34.

, . ., , . ., , ., , . ., , . ., , . ., , . ., , . & , . . 2013. c . a e e e ce c ea a a a ea a e . *Chinese Science Bulletin* **58**, 4647 54.

, . & , . 200 . ec c e c e a e a e e e . *Lithos* **113**, 274 1.

, . ., , . ., , . ., , . ., , . & , . . 2010. ea a e e a e e e c e a ace 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 c e e ec a ca 4, 73 .

, ., , . ., , ., , . ., , . ., , ., , . ., , . ., , . ., , . . & , . . 2015. e a e a e c e a e a (a). ve a- c e cea c a a - ca e ec c ev e a . *Gondwana Research*, e e 6 a 2015. . 10.1016/ . .2015.04.004.

, . 1 74. ca c c e e a a c a ac ve c e a a . *American Journal of Science* **274**, 32 355.

, ., , ., , . & , . 1 5. ac -a c a e a a e e (ea e e a). *Geology* **23**, 851 4.

, . 1 8 . *Structure of Ophiolites and Dynamics of Oceanic Lithosphere.* ec , e e e a . e ca e c e , 367 .

, . . 1 7. a e e a e e ac ce e e ea cea e . ev e ce a a e e . *Journal of Petrology* **38**, 1047 74.

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

, . ., , ., , ., , ., , . . & , . . 200 *b*. c ve a e a e a e a c a e, ea e a, a. *Acta Petrologica Sinica* **25**, 1484 1 (e e a ac).

, . ., , ., , . . & , . . 2007. ^{40} /^{3} e c e a - e e ea c a a e e a e a, ea e a, a . *Acta Petrologica Sinica* **23**, 1627 34 (e e a ac).

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

, . ., , . ., , . & , . . 2008. c ve e e- c c, e- a c a e a e- e e a e a e a e ca ca ce. *Chinese Science Bulletin* **14**, 2186 1.

, . ., , . ., , ., , . . & , . . 2010. e c a ec c e eva ce e a a c e e e c e , ea. *Lithos* **117**, 1 8 208.

, ., , . & , . 2007. e e a c -acc e c e , e e a ec c ev a aca a - a a a- cea c a c- e c e . *Journal of Asian Earth Sciences* **30**, 666 5.

, . . 2008. e c e ca e cea c a a a ca e c a ca a e ea c c ea cea c c . *Lithos* **100**, 14 48.

, . . 2014. e e e e e - e . *Elements* **10**, 101 8.

, . & , . 2001. a e a a e e, -e c e a a -a e e , a a a e a e- c ea 2.7 a a a e e e e , e v ce, a a a ca a e c ea - c e e e e c ce e . *Contribution to Mineralogy and Petrology* **141**, 36 52.

, ., , ., , . & , . 2013. e c e a e e e a- a e (a). ca e e ac e ee a ve , cea c acc e , a - e c e e e e - e cea . *Gondwana Research* **24**, 3 2 411.

, . ., , . ., , ., , . & , . 1 6. e e e e e e c- e ce e e ce e a a c a a , a- a a e a, e e a a (e). *Journal of Petrology* **37**, 6 3 726.

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

, ., , . ., , ., , . . . & , . 2012. e e e c c- c e e e a. c a e a ca a a a e . *Precambrian Research* **192–195**, 1 0 208.

, . ., , . . & , . 1 1. - e ce e ace e e e c c e a a . *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **335**, 377 2.

, ., , ., , ., , . ., , . . & , . . 1 5. ca- c e e -c a e a e e a e e a c ava . *Nature* **377**, 5 5 600.

, , . . ., , . . & , . . 1 3. v e a ec c c a e a a a e c c a a a. *Nature* **364**, 2 307.

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

, . . 2002. c e . *Reviews of Geophysics* **40**, 3-1 3-38.

, ., , . ., , . ., , . ., , . ., , ., , . ., , . . & , . . 200 . a a e c e c e e e a . e a c a e c - c c . *Science in China Series D – Earth Sciences* **52**, 1345 58.

, . . & , . . 1 8 . e ca a c e a c cea c a a . ca a e c a ce e . *Magmatism in the Ocean Basin* (e . . a e & . .), . 528 48. e ca c e , ec a - ca . 42.

, ., , ., , ., , ., , ., , ., , ., , . & , . 2008. c a c e c c e e e a. e ve acc e a e ea e a a e c. *Chemical Geology* **247**, 352 83.

, ., , ., , . ., , . ., , . . & , . . 2007. e a e ea ev a a e e a e e a a a ec c ca . *Acta Petrologica Sinica* **23**, 1 33 44 (e e a ac).

, . ., , . ., , . . & , . . 1 8. c e ac e e. e e va a a a e e . *Contributions to Mineralogy and Petrology* **133**, 1 11.

, ., , . ., , . ., , ., , . ., , . . & , . . 2006. , e e e , a e a e c e c e a a , e a ca e ec c ev a acc e a e . *Journal of Geology* **114**, 735 51.

, ., , . ., , . ., , ., , . . & , . . 200 . c a e e e a a ca c e a e e a a e c e . *Lithos* **110**, 35 72.

, ., , . . & , . . 2012. e a e a a a e c ca ev a - va ve ev e . *Earth-Science Reviews* **113**, 303 41.

, . . & , . . 1 77. e c e ca - c a e e a a e e a e e- e a c e e e e . *Chemical Geology* **20**, 325 43.

, . ., , ., , ., , ., , . & , . . 2002. e e c a e c e- e a e , a e c a e a a a ec c ev . *Journal of Geology* **110**, 71 3 .

, ., , . ., , . ., , . . & , . . 2006. c ve e e e c a e e a a ec c ca ce. *Geology in China* **33**, 476 86 (e e a ac).

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

, . ., , . ., , ., , . ., , . ., , . ., , . . & , . . 2008. e a a e a c -e a e acc e a e e a , a ca e ec- c ev e a a. *Journal of Asian Earth Sciences* **32**, 102 17.

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

, . ., , . ., , ., , ., , . ., , . . & , . . 2004. a a e c acc e a a c ve e ec c e e a . c- a e a e a e a a. *Journal of Geological Society, London* **161**, 33 42.

, . ., , . ., , . ., , . ., , ., , . ., , ., , . & , . . 200 *a*. - e a e a c e a e acc e a ce e e e a . - ca e e a c ev , a e c c e a , a e a e e a a. *International Journal of Earth Sciences* **98**, 118 217.

, . ., , . ., , ., , ., , . ., , . ., , . ., , . ., , . ., , . . & , . 200 *b*. a e c e c - acc e ce e e e a . *American Journal of Sciences* **309**, 221 70.

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

, . ., , . ., , . ., , ., , . . & , . . 2015. ev a a a - e a a c- a c a c c e c a e e a e . ca e a e c c e a e a e e e a a e c e . *Journal of Asian Earth Sciences* **113**, 75 8 .

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

, ., , ., , ., , ., , ., , ., , . & , . 2007. cc e a e e e e e a . a e c a . *Chemical Geology* **242**, 22 3 .

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

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

, . ., , ., , . ., , . . & , . . 2013. e c a e a a e . e c e , c e c , e a ca e e e c a e a. *Lithos* **179**, 263 74.

, . ., , ., , . ., , . ., , ., , . ., , . . & , . . 2012. ev e ec c e . ca e a e c ec c ev e a e . *Journal of Asian Earth Sciences* **52**, 117 33.

, . ., , . ., , ., , . . & , . . 2008. e c a a e, e a a c a e a e a e - a cea c . *Acta Petrologica Sinica* **24**, 1054 58 (e e a ac).

, . & , . . 1 86. e ca e a c . *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **14**, 4 3 571.