



VIII Congresso Ibérico
de Geoquímica
XVII Semana
de Geoquímica

GEOCROLOGIA, GEOQUÍMICA ISOTÓPICA E PETROGÉNESE DE GRANITÓIDES TERCIÁRIOS DO LESTE DO IRÃO

GEOCHRONOLOGY, ISOTOPE GEOCHEMISTRY AND PETROGENESIS OF TERTIARY GRANITOIDS FROM EASTERN IRAN

Reza Arjmandzadeh¹, José Francisco Santos^{2*}, Jorge Medina², Sara Ribeiro²,
Mohammad Hassan Karimpour¹, Seyed Ahmad Mazaheri¹, Seyed Massoud Homam¹

¹ Departamento de Geologia, Universidade Ferdowsi de Mashhad, 91775-1436 Masshad, Irão
(arjmand176@gmail.com)

² GeoBioTec, Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal (jfsantos@ua.pt)

Resumo

Os granitóides sub-vulcânicos da zona de Chah-Shaljami fazem parte da faixa vulcânico-plutónica cenozóica do Bloco de Lut (Irão central-oriental). Tratam-se de quartzo-monzonitos, granodioritos e monzodioritos que, de acordo com a geoquímica de elementos maiores e vestigiais, são co-genéticos e têm características de rochas calco-alcalinas ricas de potássio a shoshoníticas, de ambiente de arco vulcânico. Numa amostra de quartzo-monzonito foi obtida uma idade Rb-Sr (rocha total - minerais) de 33.6 ± 1 Ma; visto que esta amostra está praticamente livre de efeitos de alteração e que o arrefecimento foi provavelmente rápido, a idade de ~34 Ma deve corresponder à instalação magmática. Excepto em duas amostras, os valores iniciais de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e ϵNd nos granitóides estudados estão concentrados nos intervalos de 0.7047 a 0.7051 e de +1.9 a +2.7, respectivamente, o que é consistente com uma fonte em cunha mantélica supra-subducção e indica que não houve contribuição crustal significativa na diversificação magmática; contudo, uma amostra tem ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i superior e ϵNd _i inferior, revelando que, ocasionalmente, a assimilação de rochas crustais também contribuiu para a variação geoquímica; uma outra amostra, fortemente afectada por alteração hidrotermal, afasta-se do grupo principal somente pelo relativamente elevado valor de ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i, sugerindo que o processo hidrotermal envolveu fluidos crustais.

Palavras-chave: Bloco de Lut, Irão central-oriental, magmas calco-alcalinos, isótopos de Sr e Nd, idade Rb-Sr.

Abstract

Chah-Shaljami sub-volcanic granitoids belong to the Cenozoic volcanic-plutonic belt within the Lut Block (central eastern Iran). These intrusive rocks are mostly quartz monzonites, granodiorites and monzodiorites. Major and trace element geochemical evidence reveals that they are co-genetic and that they have features typical of high-K calc-alkaline to shoshonitic rocks from a volcanic arc setting. A Rb-Sr whole rock-mineral age of 33.6 ± 1 Ma was obtained in a quartz monzonite sample; taking into account that this sample was almost unaffected by alteration and that cooling was probably fast, the ~34 Ma date is interpreted as the intrusion age. With the exception of two samples, initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios and ϵNd values of the studied granitoids are clustered in the restricted ranges from 0.7047 to 0.7051 and from +1.9 to +2.7, respectively, which fits into a supra-subduction mantle wedge source for the parental melts and indicates that, in general, crustal contribution for magma diversification was not relevant; however, one sample shows higher ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i and lower ϵNd _i, revealing that, occasionally, crustal rock assimilation also contributed to the geochemical variation; one other sample, strongly affected by hydrothermal alteration, departs from the main group only by higher ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i, suggesting that its alteration involved crustal fluids.

Keywords: Lut Block, central eastern Iran, calc-alkaline magmas, Sr and Nd isotopes, Rb-Sr age.

1. Introdução

As rochas magmáticas de idades cenozóicas distribuem-se, no Irão, predominantemente por três faixas: a de Sahand-Bazman (Hezarkhani, 2005), ao longo de 1700 km, segundo a direcção NW-SE, na parte centro-oeste do país; a de Alborz-Azarbaijan (Nabavi, 1976), com 800 km de comprimento e direcção E-W, no norte, e cuja extremidade ocidental se sobrepõe à faixa anterior; a cintura do Irão Oriental, por seu turno, tem 1000 km de comprimento, apresenta orientação N-S e situa-se no interior do Bloco de Lut (Arjmandzadeh et al., 2011).

O Bloco de Lut é uma unidade geotectónica limitada pelas falhas de Nehbandan (a leste), Doruneh (a norte), Nayband (a oeste) e Jazmourian (a sul), que, de acordo com vários autores (e.g.: Berberian, 1973; Bagheri & Stampfli, 2008), terá tido um comportamento rígido e sofrido um movimento de rotação anti-horária durante a colisão entre a Índia e a Eurásia. O actual limite oriental do Bloco de Lut faria parte da margem activa da subducção do oceano Neothethys (e.g.: Golonka 2004; Bagheri & Stampfli 2008), o qual, no Irão oriental, fechou entre as micro-placas de Lut e do Afeganistão durante o Oligocénico e o Miocénico inferior-médio (Sengör & Natalin, 1996). Contudo, têm sido apresentadas interpretações divergentes sobre o processo de subducção terciária, nomeadamente sobre se ela terá ocorrido sob a placa do Afeganistão (Saccani et al., 2010), sob a de Lut (Eftekharnjad, 1981; Tirrul et al., 1983) ou sob ambas (Arjmandzadeh et al., 2010, 2011).

Neste trabalho, serão apresentados novos dados geocronológicos (Rb-Sr) e de geoquímica isotópica que contribuirão para uma melhor compreensão dos processos petrogenéticos e da evolução geodinâmica do Bloco de Lut.

2. Enquadramento geológico

No Bloco de Lut, estão presentes rochas metamórficas pré-jurássicas e sedimentares jurássicas, intruídas por diferentes gerações de rochas plutónicas e hipabissais (predominantemente granitóides), de idades jurássicas e terciárias, e cobertas por vulcanitos terciários, quer explosivos quer efusivos, de composições variando entre a basáltica e a riolítica. Do ponto de vista metalogénico, são de registar vários depósitos, nomeadamente de pórfiros com Cu-Mo-Au (Malekzadeh, 2009), como sucede na área de Chah-Shaljami (Khorasan meridional; leste do Irão), de onde provêm as amostras estudadas neste trabalho, colhidas numa área com cerca de 20 km², em torno do ponto com coordenadas 31°44'N, 58°58'E.

Na zona de Chah-Shaljami, afloram rochas vulcânicas, intruídas por granitóides de composições diversas. Os vulcanitos são

essencialmente tufos, basaltos, andesitos basálticos e andesitos. Kluver et al. (1978) obtiveram uma idade Rb-Sr de 40.5±2 Ma para a unidade extrusiva.

Quanto às rochas intrusivas, elas apresentam-se sob as formas de diques e de *stocks*. De acordo com Arjmandzadeh et al. (2011), distinguem-se as seguintes categorias de corpos hipabissais:

2.1. Diques e pequenos *stocks* monzodioríticos a granodioríticos

Estes corpos ocorrem nas partes central e ocidental da zona estudada e correspondem predominantemente a diques de orientação NW-SE, mas também a pequenos "stocks". As relações de campo sugerem que correspondam ao último pulso intrusivo nesta zona. São constituídos por monzodioritos e por granodioritos porfiróides, caracterizados pela presença de abundantes fenocristais euédricos a subédricos de plagioclase e hornblenda, por vezes acompanhados de biotite. Na matriz, encontram-se estes mesmos minerais, bem como quartzo e feldspato potássico anédricos. Frequentemente há testemunhos de alteração hidrotermal, nomeadamente através da presença de moscovite secundária, clorite, calcite e epidoto.

2.2. *Stocks* granodioríticos

Em toda a zona de Chah-Shaljami, podem ser encontrados "stocks" de granodioritos, que, por intruírem as rochas vulcânicas, evidenciam uma idade pós-eocénica ou eocénica superior. Estes granodioritos têm texturas porfíricas ou glomeroporfíricas, com os fenocristais e a matriz a ocuparem proporções aproximadamente equivalentes. A plagioclase e o feldspato potássico são os principais constituintes da associação fenocristalina. Na matriz, além dos feldspatos, há quartzo, em proporções sempre muito significativas, e quantidades variáveis de hornblenda e biotite. Nesta unidade, também são encontrados testemunhos de alteração hidrotermal.

2.3. *Stocks* quartzo-monzoníticos

Estes são os corpos intrusivos com maior expressão na área amostrada. As rochas que os constituem têm uma textura porfírica em que os fenocristais de plagioclase e feldspato potássico chegam a atingir 7 mm. Os fenocristais de feldspato potássico contêm habitualmente inclusões de hornblenda e biotite. Estes dois silicatos máficos também podem constituir fenocristais, mas sempre com dimensões inferiores aos dos feldspatos. A matriz dos quartzo-monzonitos é composta por plagioclase, feldspato potássico, quartzo, biotite e hornblenda.

A amostra CH32 corresponde a um caso particular que merece ser referido, pois, para além dos habituais fenocristais euédricos e subédricos de biotite, esta mica também constitui alguns agregados policristalinos irregulares. Estes agregados podem ser interpretados ou como resultado de recristalização pós-magmática de alguns fenocristais, ou como testemunhos da contaminação por sedimentos com uma componente pelítica. Na segunda hipótese, os agregados representarão porções não digeridas (mas recristalizadas, devido à transferência de calor do magma envolvente) da rocha contaminante. Como será referido numa outra secção, a composição isotópica de CH32 apoia a hipótese de contaminação.

Os quartzo-monzonitos estão relativamente frescos, embora sejam habituais os testemunhos de moscovite secundária.

3. Geoquímica elementar

De acordo com Arjmandzadeh et al. (2011), as rochas intrusivas de Chah-Shaljami têm concentrações de SiO₂ que variam entre 55.1 e 64.8 %. A razão molar Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O) é sempre inferior a 1.1, revelando que elas são metaluminosas ou só ligeiramente peraluminosas, como é típico dos granitóides de tipo I (Chappell & White, 1992). Outra característica significativa é o forte enriquecimento em K₂O (de 2.22 a 5.89 %) com o incremento de SiO₂, através dos campos composicionais, definidos por Peccerillo & Taylor (1976), para as séries calco-alcalinas ricas de potássio e shoshoníticas. O enriquecimento em Na₂O é mais moderado (de 2.68 a 4.27 %), o que leva a que a razão K₂O/Na₂O passe de 0.57 a 1.68, das rochas mais máficas para as mais félsicas.

Considerando as concentrações de elementos vestigiais, é de notar que as rochas estudadas se projectam nos campos de Pearce et al. (1984) para os granitos de arcos vulcânicos. Além disso, as baixas razões Rb/Sr (valor médio de 0.19), parecem excluir uma contribuição significativa de fonte com composição de material supracrustal (Chappell, 1999), apoiando a classificação destas rochas como granitóides do tipo I.

Em diagramas multi-elementares com normalização relativamente ao manto primordial (Sun & McDonough, 1989), nota-se um grande enriquecimento de LILE, como Rb, Ba e Cs, bem como de outros elementos incompatíveis (Th e U) cujo comportamento é próximo do dos LILE. Por outro lado, o Nb, o Ta e o Ti definem fortes anomalias negativas. Estas características são típicas de magmas relacionados com processos de subducção, em especial os gerados em arcos vulcânicos calco-alcalinos de margens continentais activas (e.g.:

Gill, 1981; Walker et al., 2001). Apesar de quer o Nb quer o Ta definirem anomalias negativas, em confronto com os restantes elementos incompatíveis, as razões Nb/Ta (10.9-16.9) são relativamente baixas, o que poderá estar relacionado com a existência de anfíbola pobre de Mg, como fase refractária, na fonte dos magmas parentais (Foley et al., 2002).

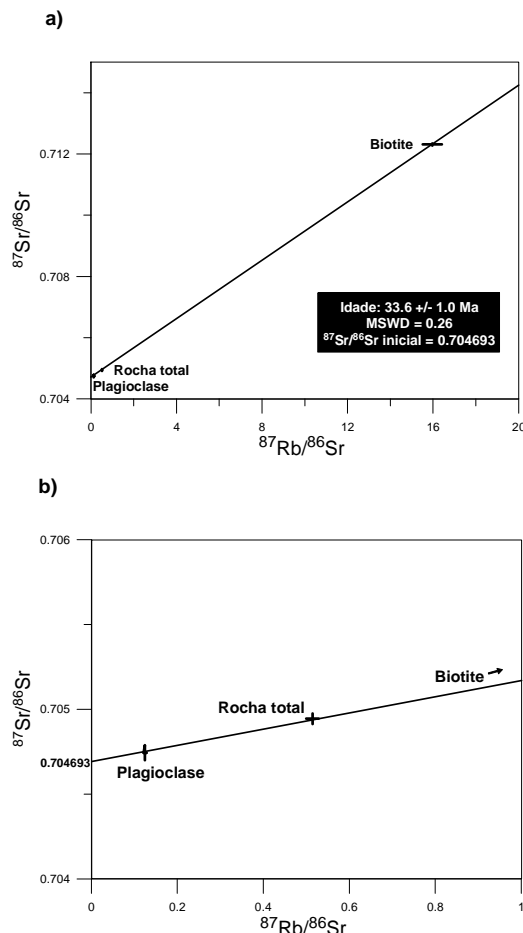


Fig. 1 – Diagrama isocrónico Rb-Sr para a amostra CH33: a) projecção das três composições analisadas (rocha total, plagioclase e biotite); b) pormenor da figura anterior, permitindo observação dos resultados referentes a rocha total e plagioclase. Para cada ponto, os traços horizontal e vertical correspondem aos erros analíticos de $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Os perfis de concentrações normalizadas de elementos das terras-raras mostram um forte enriquecimento das de menor peso atómico ($22.7 \geq \text{La}_N/\text{Yb}_N \geq 14.4$). A grande semelhança dos perfis das amostras estudadas sugere que elas estejam geneticamente relacionadas umas com as outras e possam derivar do mesmo magma inicial (Arjmandzadeh et al., 2011).

As razões Sr/Y e La/Yb nas rochas intrusivas de Chah-Shaljami variam nos intervalos 20-67 e 21-34, respectivamente, sobrepondo-se aos valores apresentados por adaquitos (Kepezhinskas et al. 1997; Castillo et al. 1999). Os valores elevados da razão Zr/Sm (25-46) nas amostras estudadas também são comparáveis aos registados em TTG precâmbrios e em adaquitos modernos (Foley et al. 2002).

Deste modo, as rochas estudadas partilham algumas características com sequências magmáticas adaquíticas. Contudo, os elevados teores de potássio encontrados nos granitóides de Chah-Shaljami contrastam com o carácter tipicamente sódico dos adaquitos (Defant & Drummond, 1990). Assim, um modelo petrogenético adequado às rochas estudadas terá que conciliar as características “shoshoníticas” e “adaquíticas” que elas manifestam.

4. Geologia isotópica – sistemas Rb-Sr e Sm-Nd

Para a obtenção de dados isotópicos para os sistemas Rb-Sr e Sm-Nd, seleccionaram-se sete amostras, as quais foram analisadas no Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade de Aveiro. O procedimento analítico já foi descrito pormenorizadamente por Arjmandzadeh et al. (2011).

Considerando que a amostra CH33 é a menos afectada quer pelos fenómenos hidrotermais quer pela alteração meteórica, ela foi seleccionada para a obtenção de uma idade Rb-Sr. Com este fim, foram analisados, para além da amostra de rocha total, concentrados de biotite e plagioclase. Os três pontos respectivos, definem uma idade de 33.6 ± 1 Ma (MSWD=0.26), com uma razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ inicial de 0.7047 (Fig. 1). Visto que a plagioclase e a rocha total se projectam próximo uma da outra no diagrama isocrónico, o resultado obtido está muito dependente da composição isotópica da biotite, pelo que ele deve ser encarado fundamentalmente como uma idade da biotite. Contudo, tendo em conta que os granitóides de Chah-Shaljami são sub-vulcânicos, o seu arrefecimento deverá ter sido rápido, pelo que a idade de 34 Ma pode ser vista como datando o evento magmático.

Para estudo geoquímico, foram determinadas composições isotópicas de Sr e Nd em sete amostras de rocha total. Para cinco delas, os valores iniciais (calculados para 34 Ma) de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ definem gamas muito restritas de 0.7047 ($\epsilon_{\text{Sr}} = +3.3$) a 0.7051 ($\epsilon_{\text{Sr}} = +8.4$) e de 0.51269 ($\epsilon_{\text{Nd}} = +1.9$) a 0.51273 ($\epsilon_{\text{Nd}} = +2.7$), respectivamente. No diagrama ϵ_{Nd}_i vs. ϵ_{Sr}_i (Fig. 2), este agrupamento de cinco pontos projecta-se à direita do “mantle array” e sobrepõe-se ao campo dos basaltos de arcos insulares (IAB). O facto de estas cinco amostras terem composições isotópicas iniciais tão semelhantes entre si sugere que a maioria das rochas intrusivas de Chah-Shaljami são co-genéticas, derivando dos mesmos líquidos parentais por processos de diferenciação magmática, como o de cristalização fraccionada. Tendo em conta a afinidade observada com os dados de Sr e Nd dos IAB, os magmas parentais ter-se-ão, provavelmente, gerado por

fusão parcial em cunha mantélica supra-subducção.

A amostra CH48 projecta-se fora do agrupamento acima considerado (Fig. 2), em consequência de ter uma composição isotópica de Sr mais radiogénica ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ inicial = 0.7055, correspondendo a $\epsilon_{\text{Sr}}_i = +14.6$). Em contrapartida, o valor de ϵ_{Nd}_i (+2.1) não se distingue do encontrado na maioria das amostras analisadas. Visto que CH48 testemunha ter sido afectada por formação de moscovite secundária, a sua posição peculiar poderá relacionar-se com um processo de alteração em que fluidos com assinatura crustal tenham tido um papel significativo (Farmer & DePaolo, 1987). Processos deste tipo podem afectar a razão isotópica de Sr sem perturbar a de Nd.

A amostra restante (CH32) destaca-se do agrupamento principal pelo valor inferior de ϵ_{Nd}_i (+0.5) e pela relativamente elevada razão inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7054, ou seja $\epsilon_{\text{Sr}}_i = +13.9$). Como já foi descrito, esta amostra contém agregados de biotite que parecem testemunhar processos de assimilação de rochas de origem supracrustal, o que é compatível com variações combinadas nos sentidos de decréscimo de $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ e de aumento $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, a partir da composição de um magma de origem mantélica.

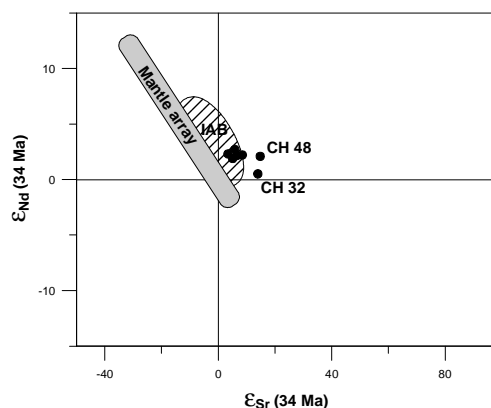


Fig. 2 – Diagrama ϵ_{Nd} vs. ϵ_{Sr} das composições isotópicas iniciais (34 Ma) das rochas de Chah-Shaljami. *Mantle array* e campo para os basaltos de arco insular (IAB) baseados em várias sínteses, nomeadamente as de DePaolo (1988), Faure & Mensing (2005) e Dickin (2005).

5. Origem dos magmas parentais e implicações tectónicas

Os granitóides de Chah-Shaljami, apesar de revelarem alguma afinidade adaquítica, são fortemente enriquecidos em elementos como o K e o Rb, em comparação com os adaquitos típicos. A ascensão dos magmas através da crosta continental poderia ter causado contaminação que levasse ao aumento das concentrações de K e Th e das razões Rb/Sr e LILE/HFSE, durante os processos de assimilação e cristalização fraccionada (Esperanca et al., 1992). Contudo, a forte homogeneidade isotópica inicial das rochas de Chah-Shaljami parece excluir esse tipo de mecanismo como determinante na génese da

sequência magmática estudada. Das amostras estudadas, só uma (CH32) é que apresenta testemunhos de assimilação de material supracrustal, enquanto as outras parecem relacionar-se através de mecanismos de cristalização fraccionada e/ou fusão parcial a partir de uma fonte comum. Deste modo, os valores elevados de K_2O e de Rb/Sr deverão estar predominantemente relacionados com características da fonte do magma primitivo, e não com processos AFC.

Ionov & Hofmann (1995) revelaram, com base no estudo de xenólitos, que as anfíobolas mantélicas podem ser ricas de K mas conter concentrações muito baixas de Rb, enquanto a flogopite coexistente é rica em ambos os elementos referidos. Assim, uma forte participação de decomposição da flogopite durante a génese dos magmas parentais da sequência de Chah-Shaljami explicaria algumas das suas mais importantes características composicionais, nomeadamente a sua afinidade shoshonítica.

Por outro lado, a presença de granada e anfíbola pobre de Mg como fases refractárias explicaria o forte fraccionamento das terras-raras, com um claro empobrecimento das mais pesadas, e as relativamente baixas razões Nb/Ta.

De acordo com vários autores (e.g.: Sen & Dunn, 1994; Prouteau et al., 2001), os processos de metassomatismo no manto por acção de líquidos provenientes da crosta subductada deverão produzir associações com ortopiroxena, clinopiroxena, granada, flogopite e richterite ou pargasite. Deste modo, numa cunha mantélica acima dum plano de subducção, poderão ocorrer, em rochas assim metassomatizadas, processos de fusão que originem magmas parentais como os responsáveis pela sequência de Chah-Shaljami.

De acordo com as reconstituições palaeogeográficas mais aceites envolvendo a região que abarca as partes oriental do Irão e ocidental do Afeganistão (e.g.: Sengör & Natalin, 1996; Shafiei et al., 2009), o Bloco de Lut, no Paleogénico, situar-se-ia na margem neothetysiana do microcontinente do Irão Central. Contudo, há diversos modelos quanto à posição da zona de subducção que estaria activa. Alguns autores, dando especial atenção a dados estruturais de formações de prisma acrecionário propõem modelos considerando uma zona de subducção mergulhando para NE (Camp & Griffis., 1982; Tirrul et al., 1983; Sacconi et al., 2010). Em contrapartida, com base na importância do magmatismo calcoalcalino no leste do Irão, noutros trabalhos apresentam-se modelos em que a subducção ocorreria sob o Bloco de Lut (Eftekharnajad, 1981; Shahabpour, 2001). Recentemente, Arjmandzadeh et al. (2010, 2011) propuseram um modelo de subducção dupla, assimétrica, sob ambas as margens envolvidas, aplicando à

região em causa o modelo de Doglioni et al. (2009).

Independentemente dos detalhes de cada modelo tectónico específico, os dados geoquímicos e isotópicos da associação magmática de Chah-Shaljami revelam que esta é um claro testemunho de processos de subducção sob o Bloco de Lut no Oligocénico.

6. Conclusões

Os dados isotópicos de Rb-Sr, em rocha total e minerais (biotite e plagioclase) de uma amostra da associação de granitóides subvulcânicos de Chah-Shaljami, permitiram a obtenção de uma idade de 33.6 Ma, interpretada como datando a instalação magmática. Os dados de geoquímica isotópica, com os valores de $^{87}Sr/^{86}Sr$ e ϵNd iniciais, em amostras não perturbadas por processos de alteração ou assimilação, a variarem entre 0.7047 e 0.7051 e +1.9 e +2.7, são consistentes com uma origem dos magmas parentais numa cunha mantélica sobrejacente a uma zona de subducção. Estes resultados estão de acordo com a informação de geoquímica elementar que revelam características de magmatismo calcoalcalino, tais como o enriquecimento em LILE e as anomalias negativas de Nb, Ta e Ti. A afinidade adaquítica, testemunhada por elevadas razões LREE/HREE e baixos teores de HREE e Y, pode ser explicada pela presença de granada na fonte mantélica. A grande homogeneidade isotópica da maioria das rochas estudadas revela que elas se relacionam principalmente por processos de diferenciação magmática, como a cristalização fraccionada. Assim, as elevadas concentrações de K_2O deverão estar relacionadas com a composição da fonte e não com uma hipotética assimilação de materiais crustais. Os magmas parentais derivaram provavelmente de fusão parcial de peridotito mantélico previamente metassomatizado. Durante o processo de fusão, a flogopite terá sofrido decomposição, enquanto a granada e uma anfíbola pobre de Mg terão participado na associação mineralógica refractária. Em termos tectónicos, os dados agora obtidos constituem um novo testemunho da ocorrência, durante o Paleogénico, de subducção sob o Bloco de Lut.

Referências bibliográficas

- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J.M., Homam, S.M., 2010. Two sided asymmetric subduction: new hypothesis for the tectonomagmatic and metallogenic setting of the Lut Block, Eastern Iran. First Conference of the Iranian Society of Economic Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad (Iran): 377-382.
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J., Homam, S.M. (2011).

- Sr–Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shajami granitoids (Lut Block, Eastern Iran). *Journal of Asian Earth Sciences* 41: 283–296.
- Bagheri, B., Stampfli, G.M., 2008. The Anarak, Jandaq and Posht-e- Badam metamorphic complexes in central Iran: new geological data, relationships and tectonic implications. *Tectonophysics*, 451: 123–155.
- Berberian, M., 1973. Structural History of Lut Zone. Geological Survey of Iran, Tehran, Internal Report 34.
- Camp, V.E., Griffis, R.J., 1982. Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos* 15: 221-239.
- Castillo, P.R., Janney, P.E., Solidum, R.U., 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 134: 33–51.
- Chappell, B.W., White, A.J.R., 1992. I- and S-type granites in the Lachlan fold belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences* 83: 1–26.
- Chappell, B.W., 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos* 46: 535–551.
- Defant, M.J., Drummond, M.S., 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature* 347: 662–665.
- DePaolo, D.J., 1988. Neodymium Isotope Geology: an Introduction. Springer, New York. 187 pp.
- Dickin, A.P., 2005. Radiogenic Isotope Geology. Cambridge University Press, Cambridge. 492 pp.
- Dogliani, C., Tonarini, S., Innocenti, F., 2009. Mantle wedge asymmetries and geochemical signatures along W- and E–NE directed subduction zones. *Lithos* 113: 179–189.
- Eftekharijad, J., 1981. Tectonic division of Iran with respect to sedimentary basins. *Journal of Iranian Petroleum Society*, 82: 19–28 (in Persian).
- Esperanca, S., Crisci, M., de Rosa, R., Mazzuli, R., 1992. The role of the crust in the magmatic evolution of the island Lipari (Aeolian Islands, Italy). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 112: 450–462.
- Farmer, G. L., DePaolo, D. J., 1987. Nd and Sr isotope study of hydrothermally altered granite at San Manuel, Arizona; implications for element migration paths during the formation of porphyry copper ore deposits. *Economic Geology* 82: 1142-1151.
- Faure, G., Mensing, T.M., 2005. *Isotopes: Principles and Applications*. Wiley, Hoboken. 897 pp.
- Foley, S., Tiepolo, M., Vannucci, R., 2002. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones: *Nature* 417: 837–840.
- Gill, J.B., 1981. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Springer, New York. 390 pp.
- Golonka, J., 2004. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic. *Tectonophysics* 38: 235–273.
- Hezarkhani, A., 2005. Petrology of the intrusive rocks within the Sungun Porphyry Copper Deposit, Azerbaijan, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 25: 1-15.
- Ionov, D.A., Hofmann, A.W., 1995. Na–Ta-rich mantle amphiboles and micas: implications for subduction-related metasomatic trace element fractionations. *Earth and Planetary Science Letters*, 131: 341–356.
- Kepezhinskas, P.K., McDermott, F., Defant, M.J., Hochstaedter, F.G., Drummond, M.S., Hawkesworth, C.J., Koloskov, A., Maury, R.C., Bellon, H., 1997. Trace element and Sr–Nd–Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka arc petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61: 577–600.
- Kluyver, H.M., Griffis, R.J., Tirrul, R., Chance, P.N., Meixner, H.M., 1978. Explanatory Text of the Lakar Kuh Quadrangle 1:250000, Geological Survey of Iran.
- Malekzadeh, A., 2009. Geology, Mineralization, Alteration, Geochemistry, Microthermometry, Isotope Studies and Determining the Mineralization Source of Khoopic and Maherabad Exploration Areas. PhD Thesis. Ferdowsi University of Mashhad (Iran).
- Nabavi, M., 1976. An Introduction to the Geology of Iran. Geological Survey of Iran Publication, 109 pp (in Persian).
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25: 956–983.
- Peccerillo, A., Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58: 63-81.
- Prouteau, G., Scaillet, B., Pichavant, M., Maury, R., 2001. Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted oceanic crust. *Nature* 410: 197–200.
- Saccani, E., Delavari, M., Beccaluva, L., Amini, S.A., 2010. Petrological and geochemical constraints on the origin of the Nehbandan ophiolitic complex (eastern Iran): Implication for the evolution of the Sistan Ocean. *Lithos* 117: 209-228.
- Sen, C., Dunn, T., 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: Implications for the origin of adakites: *Contributions to Mineralogy and Petrology* 117: 394–409.
- Sengör, A.M.C., Natalin, B.A., 1996. Paleotectonics of Asia: fragment of a synthesis. In: An, Y., Harrison T.M. (eds), *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge University Press, Cambridge: 486–640.

- Shahabpour, J., 2001. Economic Geology. Publication of Shahid Bahonar university of Kerman. 543 pp.
- Shafiei, B., Haschke, M., Shahabpour, J., 2009. Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. *Mineralium Deposita* 44: 265–283.
- Sun, S.-s., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. Spec. Publ., London, 42: 313-345.
- Tirrul, R., Bell, I.R., Griffis, R.J., Camp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 94: 134-150.
- Walker, J.A., Patino, L.C., Carr, M.J., Feigenson, M.D., 2001. Slab control over HFSE depletions in central Nicaragua. *Earth and Planetary Science Letters* 192: 533–543.