

Abstract

Porphyry deposits occur in Andean-type subduction zones but also in post-subduction, collisional to extensional settings (Richards, 2011). Processes leading to the formation of magmatic systems associated with mineralization in these two different contexts might be different as different could also be their metal endowments. It is therefore important to understand similarities and differences in the magmatic processes (e.g. source of magmas, intra-crustal evolution of primary magmas) leading to the formation of porphyry deposits in these two different contexts.

This study focusses on the Miocene Kışladağ Au (-Mo) porphyry deposit (16.8 Moz Au) in western Anatolia, Turkey. The deposit is centered on a series of monzonitic to quartz-monzonitic porphyry stocks of high-K calc-alkaline to shoshonitic affinity. Based on the geochronologic evidence as well as paleo-tectonic reconstructions (see also section 3, Geological setting) delivered by numerous workers (e.g. van Hinsbergen 2010; Karaoglu and Helvacı, 2012b; Rossetti et al., 2017), Kışladağ has developed in a post-collisional to extensional tectonic setting.

Zircon U-Pb dating by LA-ICPMS reveals that all porphyry intrusions from Kışladağ, from the early pre-mineral Intrusion 1 (best mineralised) to the post mineral Intrusion 3 and Emirli Tepe lava, were emplaced in close temporal succession without major temporal gaps ($\approx \geq 100$ ka) in between. Our zircon age dating is in good agreement with crosscutting relationships, hydrothermal mineral dates and previous TIMS U-Pb dating (Baker et al., 2016) and suggests an emplacement succession starting with Intrusion 1 (14.73 ± 0.05 Ma), followed by Intrusion 2A (14.60 ± 0.06 Ma), Intrusion 2 (14.45 ± 0.08 Ma), Intrusion 3 (Int.3 Central: 14.39 ± 0.06 and Int.3 W: 14.36 ± 0.13 Ma) and finally the Emirli Tepe lava (14.26 ± 0.09 Ma). Bracketing the maximal hydrothermal lifespan of the deposit between the weighted mean ages of the pre-mineral Intrusion 1 and post-mineral Intrusion 3 yields a maximum duration of ≈ 400 ka.

Combining zircon geochronology, textures, trace elements and Hf isotopes reveals a slowly cooling and crystallising, relatively felsic (probably shallow) magma chamber below Kışladağ between ≈ 15.8 and 14.9 Ma. The cooling and crystallisation of this magma reservoir has been accompanied by crustal wallrock assimilation as suggested by increasingly less radiogenic Hf isotopic compositions between ≈ 15.8 and 14.9 Ma in antecrystic zircons from Intrusion 1 and 2A. A major switch in the magmatic evolution of Kışladağ occurred at ≈ 14.85 Ma when a hot, more mafic magma rejuvenated this cooling and crystallising magma reservoir. Zircon textures and chemistry further suggest sustained input of more mafic magma into the magma chamber below Kışladağ as well as rising temperatures in the system from ≈ 14.85 Ma onwards until at least the formation of the Emirli Tepe lava at ≈ 14.26 Ma. A general trend towards more primitive whole rock Nd (Sr and Pb) isotopic compositions as well as Hf isotopic compositions in zircons from Kışladağ rocks between ≈ 14.85 and 14.26 Ma is in good agreement with continuous mafic magma injection (zircons from this mafic magma have more radiogenic Hf isotopic compositions) into the magma chamber below Kışladağ. This could have been accompanied by decreasing amounts of crustal wallrock assimilation as suggested by decreasing numbers of xenocrystic zircons from the basement over time. Petrological evidence from whole rock samples such as enclaves, xenocrysts and mineral disequilibrium textures supports magma rejuvenation and mixing.

In order to check if (and if applicable which) there was a relationship between the oxygen fugacity of the magmas at Kışladağ and the mineralisation, we analysed zircon Eu and Ce anomalies as a proxy for oxygen fugacity in the magma. Neither Eu nor Ce anomalies show any clear differences between the different Kışladağ intrusions or the Emirli Tepe lava at a given value of magma evolution proxies in zircon (e.g. Yb/Gd ratio). However, while Eu anomalies seem to have been considerably affected by plagioclase crystallisation and do not provide any revealing information about magma redox conditions, Ce anomalies might reveal a more distinctive oxidising event roughly simultaneous with the emplacement of Intrusions 1 and 2. This oxidising event might have been caused by large amounts of volatile-rich fluid exsolution following the onset of mafic rejuvenation of the crystal mush in the magma chamber below Kışladağ. Mafic rejuvenation and subsequent volatile exsolution might also have been one of the key factors in triggering economic porphyry formation.

Résumé

Des gisements porphyriques peuvent être trouvés dans des zones de subduction de type andéen mais aussi dans des contextes de post-subduction, de collision à extension (Richards, 2009). Les processus menant à la formation de systèmes magmatiques associées avec des minéralisations dans ces contextes tectoniques distincts pourraient être différents ainsi que pourraient l'être leurs dotations de métaux. Il est donc important de comprendre les similitudes et les différences entre les processus magmatiques menant à la formation de gisements porphyriques dans ces deux contextes différents. Cette étude porte sur le gisement porphyrique Miocène d'or (\pm molybdène) de Kışladağ (16.8 Moz Au) en Anatolie de l'ouest, Turquie. Le gisement est centré sur une série d'intrusions porphyriques monzonitiques à quartz-monzonitiques d'affinité calc-alkaline riche en potassium à shoshonitique. Basé sur de l'évidence géochronologique ainsi que des reconstructions paleotectoniques (voir aussi section 3 Contexte géologique) fournies par de nombreux auteurs (e.g. van Hinsbergen 2010; Karaoglu and Helvacı, 2012b; Rossetti et al., 2017), Kışladağ s'est formé dans un contexte tectonique post-collisionnel à extensionnel.

Des datations U-Pb par LA-ICPMS sur zircon révèlent que toutes les intrusions porphyriques de Kışladağ, de l'intrusion 1 pré-minérale à l'Intrusion 3 et la lave d'Emirli Tepe post-minérales, ont été emplacements en séquence temporelle immédiate sans écarts temporels majeurs ($\approx \geq 100$ ka) entre. Nos datations de zircons sont en bon accord avec des relations de recoupement, des dates de minéraux hydrothermaux ainsi que des datations U-Pb TIMS effectuées antérieurement par Baker et al. (2016) et suggèrent une succession d'emplacement commençant par l'Intrusion 1 (14.73 ± 0.05 Ma), suivie par l'Intrusion 2A (14.60 ± 0.06 Ma), l'Intrusion 2 (14.45 ± 0.08 Ma), l'Intrusion 3 (Int.3 Centrale : 14.39 ± 0.06 and Int.3 Ouest : 14.36 ± 0.13 Ma) et finalement la lave d'Emirli Tepe (14.26 ± 0.09 Ma). En restreignant la durée de vie hydrothermale maximale du gisement entre la moyenne pondérée de l'Intrusion 1 pré-minérale et de l'Intrusion 3 post-minérale donne une durée maximale de ≈ 400 ka.

Combinant la géochronologie des zircons, leurs textures, éléments en trace et signatures isotopiques de l'Hf, révèle une chambre magmatique relativement felsique (probablement peu profonde) en dessous de Kışladağ qui subit un refroidissement et une cristallisation lente entre ≈ 15.8 et 14.9 Ma. Le refroidissement et la cristallisation de ce réservoir magmatique a été accompagné par de l'assimilation de roche encaissante crustale du socle métamorphique de Menderes comme le suggèrent des signatures isotopiques de l'Hf de zircons antecrystiques de l'Intrusion 1 et 2A de moins en moins radiogéniques entre ≈ 15.8 et 14.9 Ma. Un changement majeur dans l'évolution magmatique de Kışladağ a eu lieu vers 14.85 Ma avec l'injection d'un magma plus chaud et mafique dans ce réservoir magmatique en train de refroidir et de cristalliser. En outre, des textures et la chimie de zircons indiquent une recharge continue d'un magma plus mafique dans la chambre magmatique en dessous de Kışladağ ainsi que des températures croissantes dans le système à partir de ≈ 14.85 Ma jusqu'à au moins la formation de la lave d'Emirli Tepe à ≈ 14.26 Ma. Une tendance générale d'isotopes du Nd (Sr et Pb) de roche totale de Kışladağ ainsi que des isotopes de l'Hf dans les zircons de ces mêmes roches envers des compositions isotopiques plus primitives entre ≈ 14.85 et 14.26 Ma est en bon accord avec des injections continues de magma mafique (les zircons de ce magma mafique ont des compositions isotopiques de l'Hf plus radiogéniques) dans la chambre magmatique en dessous de Kışladağ. Ceci a pu être accompagné par une assimilation décroissante de roche encaissante crustale comme indiqué par des nombres décroissants de zircons xénocrystiques du socle au cours du temps. De l'évidence pétrologique d'échantillons de roche totale comme par exemple des enclaves, des xénocrystes et des textures de déséquilibre de minéraux confortent une réjuvenation et du mélange magmatique.

Afin de savoir s'il y avait un lien (et le cas échéant lequel) entre la fugacité d'oxygène dans les magmas de Kışladağ et la minéralisation, nous avons analysé des anomalies en Eu et Ce dans les zircons comme proxy de la fugacité d'oxygène dans le magma. Ni les anomalies en Eu, ni ceux en Ce montrent une quelconque différence claire entre les différentes intrusions de Kışladağ ou la lave de Emirli Tepe à une valeur donnée de proxies pour l'évolution magmatique (e.g. rapport Yb/Gd). Par contre, alors que les anomalies en Eu semblent avoir été considérablement affecté par de la cristallisation de plagioclase et

ne fournissent pas d'information significative concernant les conditions rédox des magmas, les anomalies en Ce pourraient indiquer un événement oxydant plus marqué à peu près simultané avec l'emplacement de l'Intrusion 1 et 2. Cet événement oxydant a éventuellement pu être causé par l'exsolution de grandes quantités de fluides riches en volatiles, suite à la réjuvenation du magma dans la chambre en dessous de Kışladağ. Cette injection de magma mafique et une exsolution de volatiles consécutive a également pu être un des facteurs déclenchants pour une formation de porphyre économique.