

Géochronologie du zircon détritique U-Pb des sédiments du Carbonifère supérieur de la formation de Benxi dans le craton de Chine du Nord : implications pour l'évolution tectonique-sédimentaire

Comptes Rendus. Géoscience, Tome 352 (2020) no. 2, pp. 169-184.

Mo Wuling ; Fan Liyong ; Wei Guoqi ; Liu Xinshe ; Zhang Chunlin ; Liu Mancang ; Su Nan ; Liu Yan ; Wu Saijun ; Xing Fengcun

(traduction de DeepL post-éditée par N. Bacaër, suggestions d'amélioration : nicolas.bacaer@ird.fr)



Résumé

La provenance de la formation du Benxi du Carbonifère supérieur dans le craton du nord de la Chine (CCN) a été considérée comme la marge nord du CCN, et non comme la ceinture orogénique de North Qinling. Pour comprendre la provenance et l'évolution tectonique-sédimentaire au cours de la période sédimentaire de la formation de Benxi, l'analyse géochronologique U-Pb du zircon a été réalisée sur onze échantillons de grès clastiques. Le sud du CCN a reçu des sédiments clastiques de la ceinture orogénique de Qinling Nord. Les mouvements orogéniques autour du CCN au cours du Carbonifère supérieur ont eu des impacts significatifs sur les changements de la paléotopographie. Au cours de la première période sédimentaire du membre hutien de la formation de Benxi, le nord de la ceinture orogénique Qinling a été rapidement soulevé, et la paléotopographie a été soulevée vers le sud et plongée vers le nord ; ainsi, la source clastique était la ceinture orogénique Qinling Nord. De la fin de la période sédimentaire du membre hutien de la formation de Benxi à la période sédimentaire du membre Jinci, la paléotopographie s'est inversée. La marge nord du CCN s'est rapidement soulevée, et la paléotopographie s'est déplacée vers le nord et vers le sud. Deux provenances distinctes étaient présentes dans les sédiments de la formation de Benxi. Les sédiments étaient principalement fournis par la provenance du nord.

1. Introduction

Le craton de Chine du Nord (CCN) est bordé au nord par l'arc de Bainaimiao, situé dans la partie sud de la ceinture orogénique d'Asie centrale [Xu et al. 2013 ; Zhang et al. 2007a,b ; Faure et al. 2007 ; Shi et al. 2013a,b], et au sud par l'arc de Qinling Nord dans la ceinture orogénique de Qinling Nord (figure 1) [Chen 1998 ; Mattauer et al. 1985 ; Wang et al. 2016 ; Zhu et al. 2007]. Au cours de l'ère paléozoïque, le CCN a connu un hiatus sédimentaire d'environ 150 Ma entre l'Ordovicien moyen et le Carbonifère supérieur. La formation de Benxi (du système pennsylvanien) a déposé un ensemble de strates dominées par le clastique sur les couches carbonatées de l'Ordovicien.

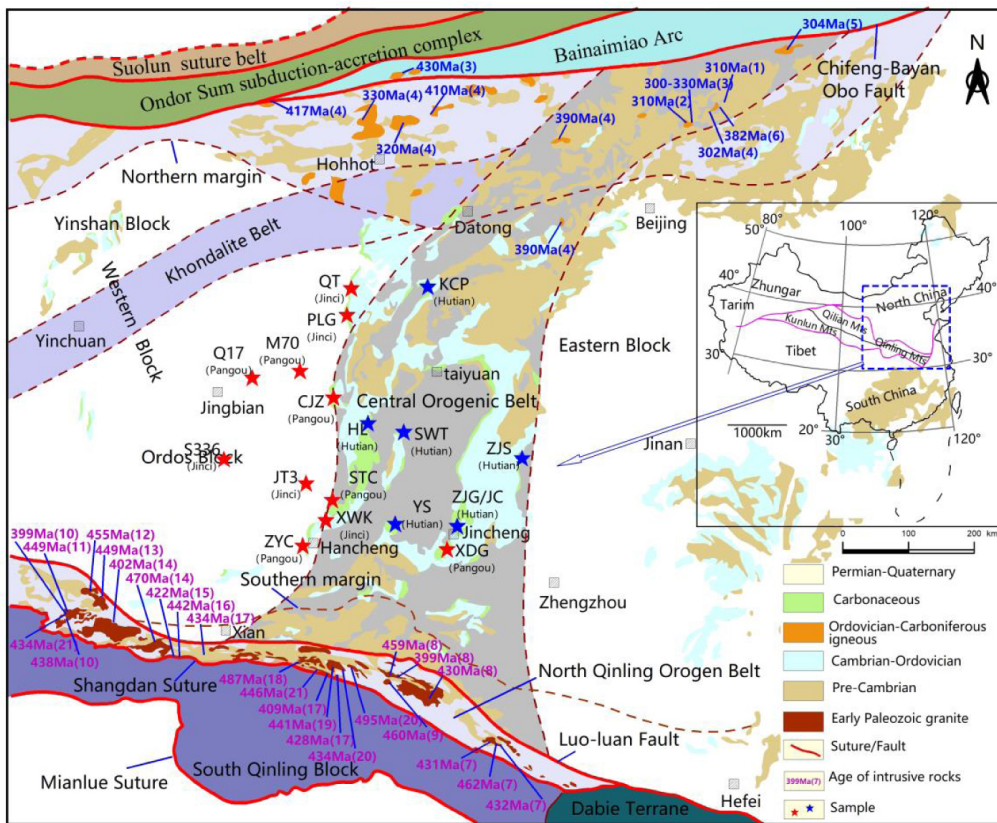


Figure 1. Carte géologique régionale du craton de Chine du Nord. Les données sur l'âge du zircon U-Pb présentées sur cette carte sont tirées de (1) [Zhang et al. 2004] ; (2) [Zhang et al. 2007a] ; (3) [Zhang et al. 2007b] ; (4) [Zhang et al. 2011] ; (5) [Zhang et al. 2006a] ; (6) [Shi et al. 2013a,b] ; (7) [Jiang et al. 2009] ; (8) [Tian 2003] ; (9) [Guo et al. 2010] ; (10) [Wen et al. 2008] ; (11) [Pei et al. 2007] ; (12) [Chen et al. 2007] ; (13) [Xu et al. 2008] ; (14) [Xue et al. 1996] ; (15) [Lerch et al. 1995] ; (16) [Yan et al. 2007] ; (17) [Lu et al. 2003] ; (18) [Sun 1991] ; (19) [Li et al. 2008] ; (20) [Wang et al. 2009] ; (21) [Zhang et al. 2006b]. Les endroits marqués en rouge sont les sites d'échantillonnage de cette étude. Les sites marqués en bleu sont ceux de Cai (2014) (KCP, HL, SWT, YS, ZJG, JC), Wang et al. [2016] (ZJS).

La plupart des études ont confirmé la présence d'un système sédimentaire delta-fluvial dans la partie nord du CCN et d'un système sédimentaire lagunaire insulaire dans la partie sud pendant la formation du Benxi du Carbonifère supérieur [Chen et al. 2010 ; Li et al. 2014 ; Shao et al. 2014 ; Zhu et al. 2007].

Ces études ont considéré la marge nord du CCN comme la provenance du grès et des conglomérats du système des îles barrières. Hou et al. 2018] ont montré que la formation carbonifère du Benxi était le complexe marée-delta des associations de faciès dans la partie nord du CCN, et la masse de sable indiquant que le delta a été développé dans la partie sud du CCN. Jia et al. 2019] ont démontré qu'il y avait un système de provenance principal dans les parties nord et sud du CCN. L'approvisionnement en provenance du nord était évident et dominant.

Les bauxites de type karstique contiennent généralement du zircon détritique en abondance [Deng et al. 2010] qui peut être utilisé pour étudier la provenance sédimentaire et l'évolution tectonique des régions sources [Cawood et al. 2012]. Des tentatives ont été faites pour étudier l'âge U-Pb du zircon dans la bauxite [Cai 2014 ; Wang et al. 2016], ce qui suggère que le zircon détritique dans la bauxite du Carbonifère supérieur pourrait provenir des montagnes aux marges nord et sud du CCN. Cependant, aucune recherche n'a été menée sur la géochronologie U-Pb du zircon détritique pour les échantillons de grès récupérés dans les parties moyenne et supérieure (les membres de Pangou et Jinci) (figure 2) de la formation de Benxi dans la partie sud du CCN. En général, il existe une série de problèmes concernant la période du Benxi du Carbonifère supérieur dans le CCN, tels que l'environnement tectonique régional, la source des sédiments et l'évolution de la ceinture orogénique de Qinling Nord. Dans cette étude, nous avons collecté des échantillons de grès dans la formation de Benxi avec d'abondants zircons détritiques et nous avons combiné les données avec les résultats des études précédentes sur la géochronologie U-Pb des zircons dans la bauxite au fond de la formation de Benxi. Nous avons ensuite procédé à la géochronologie du zircon U-Pb et à l'analyse des isotopes Hf. Enfin, nous avons discuté de la source des zircons détritiques dans les sédiments de la formation de Benxi déposés dans le CCN, et de l'évolution tectonique-sédimentaire de la provenance, fournissant ainsi de nouvelles données pour l'étude de la relation de couplage bassin-montagne et l'exploration du gaz naturel de la formation de Benxi.

La ceinture orogénique d'Asie centrale méridionale est composée du complexe de subduction-accrétion Ondor Sum et du terrane de l'arc de Bainaimiao [Zhu et al. 2007]. Les complexes de subduction-accrétion d'Ondor Sum contiennent de la turbidite, de la mylonite haute pression et du blueschist. L'âge $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ du glaucophane dans le blueschist va de 446 ± 15 à 426 ± 15 Ma [De Jong et al. 2006]. L'âge de la roche volcanique de l'Ordovicien moyen précoce dans l'arc de Bainaimiao est déterminé par biostratigraphie. Des roches intrusives d'environ 450 Ma sont très répandues dans cette région [Li et al. 2012]. Le conglomérat du Silurien tardif, les roches sédimentaires clastiques néritiques et les roches carbonatées recouvrent de façon non concordante l'arc de Bainaimiao. À la fin du Carbonifère, l'arc a été réactivé par la subduction vers le sud de l'océan Paléo-Asiatique pour former les roches volcaniques mafiques-felsiques.

3. Caractéristiques géologiques de la formation carbonifère du Benxi

La formation de Benxi a été déposée à la période initiale du Paléozoïque tardif dans le CCN, suite à la transgression de la mer de Chine du Nord par le nord-est. La formation de Benxi a été déposée dans la croûte d'altération de l'Ordovicien au Paléozoïque inférieur, et son épaisseur dépendait principalement de la paléotopographie. Elle était généralement épaisse dans la zone déprimée et mince, voire absente, dans la zone de la plate-forme haute, allant de 5 à 120 m. En général, l'épaisseur totale s'amincit du nord au sud.

La formation de Benxi est divisée en trois membres (figure 2), Hutian, Pangou et Jinci, par ordre croissant. Le membre Hutian est composé d'un ensemble de bauxite grise, gris-blanc et de mudstone bauxitique, qui est généralement considéré comme le dépôt de mudstone de la croûte altérée ou de mudstone des marais dans la plaine alluviale [Chen et al. 2010 ; Shao et al. 2014 ; Hou et al. 2018 ; Jia et al. 2019 ; Li et al. 2014 ; Shao et al. 2014]. Le membre de Pangou est composé de grès, de conglomérat, de siltstone, de schiste argileux, de charbon et de calcaire. Le conglomérat contient des graviers de quartz qui sont modérément triés et bien ou mal arrondis. Le conglomérat est développé dans les parties sud et sud-ouest du bloc de l'Ordos, tandis que le conglomérat dans la partie nord est assez rare. Le membre Jinci contient un grès de quartz gris-blanc, gris-vert et gris-brun au fond, le calcaire au milieu et les couches de charbon n° 8 et n° 9 au sommet.

La composition clastique du grès et du conglomérat de la formation de Benxi est dominée par le quartz et une petite quantité de clastes de roches métamorphiques dans la partie nord-est du bloc de l'Ordos, et par le quartz, les clastes de roches métamorphiques et une petite quantité de roches sédimentaires et de débris de roches volcaniques dans la partie sud. Le grès de la formation de Benxi dans la partie nord du bloc de l'Ordos est généralement de couleur bleue sous cathodoluminescence, ce qui implique la présence de roches ignées dans la roche mère. Dans la partie sud, les particules de quartz sont généralement brun foncé, ce qui implique la roche mère des roches métamorphiques [Jia et al. 2019].

4. Échantillon et méthode d'analyse

Le zircon détritique peut être utilisé pour retracer les roches mères en raison de son abondance dans le grès de la formation de Benxi. Dans cette étude, la datation U-Pb du zircon a été réalisée à partir d'échantillons de grès prélevés dans la région de Xiaodonggou (XDG) à Jincheng, dans la région de Zhuyuancun (ZYC) à Hancheng, dans la région de Xiweikou (XWK) à Hejin, Zone de Shantoucun (STC) à Puxian, puits Jitan-3 (JT3), puits Shan-336 (S336), puits Mi-70 (M70), puits Qi-17 (Q17), zone de Chengjiazhuang (CJZ) à Liulin, zone de Palougou (PLG) à Baode, et zone de Qiaotou (QT) à Baode (Figure 1). Les lieux d'échantillonnage sont indiqués dans les figures 1 et 2. Le principal type de roche des échantillons est le grès de quartz et une petite quantité de grès de quartz lithique ; le feldspath est à peine développé. Les échantillons contiennent 76-92% de quartz, 6-20% de débris de roches métamorphiques, 1-3% de débris de roches sédimentaires, et 1% de débris de roches magmatiques [Jia et al. 2019]. Ensuite, la cathodoluminescence (CL) des zircons détritiques a été réalisée. Les caractéristiques morphologiques du zircon détritique ont été analysées à condition d'éviter les fractures et les inclusions. Dans chaque échantillon, 100 points ont été sélectionnés pour la datation U-Pb. Pendant ce temps, des mesures isotopiques de Hf ont été effectuées pour six échantillons, XDG, ZYC, XWK, STC, CJZ et QT.

Les grains de zircon ont été séparés en broyant les échantillons à 40 mailles (420 μm), puis en utilisant des techniques conventionnelles de liquide lourd et de magnétisme, suivies d'une cueillette manuelle sous un microscope binoculaire. Leurs structures internes ont été documentées à l'aide d'images de luminescence cathodique (CL). Les images CL ont ensuite été utilisées pour sélectionner des cibles pour l'analyse isotopique U-Pb [Wang et al. 2016]. La spectrométrie de masse à plasma induit par ablation laser et multicollecteur (LA-MC-ICP-MS) a été utilisée pour analyser les zircons détritiques sélectionnés pour les âges U-Pb et les isotopes Hf. Les grains de zircon sélectionnés ont été analysés à l'aide d'un Nu Plasma II MC-ICP-MS équipé d'une source laser ASI RESOLUTION LR 193 nm ArF au State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University of China, selon les procédures décrites dans [Liu et al. 2007]. Les conditions de fonctionnement et les procédures d'analyse des isotopes Hf sont décrites dans Hu et al [2012]. Nous avons utilisé les valeurs actuelles de la chondrite de $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0,282772$ et $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0,0332$ [Blichert-Toft et Albarède 1997] pour calculer $\varepsilon\text{Hf}(0)$, et les âges U-Pb du zircon observés et la constante de désintégration de ^{176}Lu ($1,865 \times 10^{-11} \text{ an}^{-1}$; [Scherer et al.]) pour calculer $\varepsilon\text{Hf}(t)$.

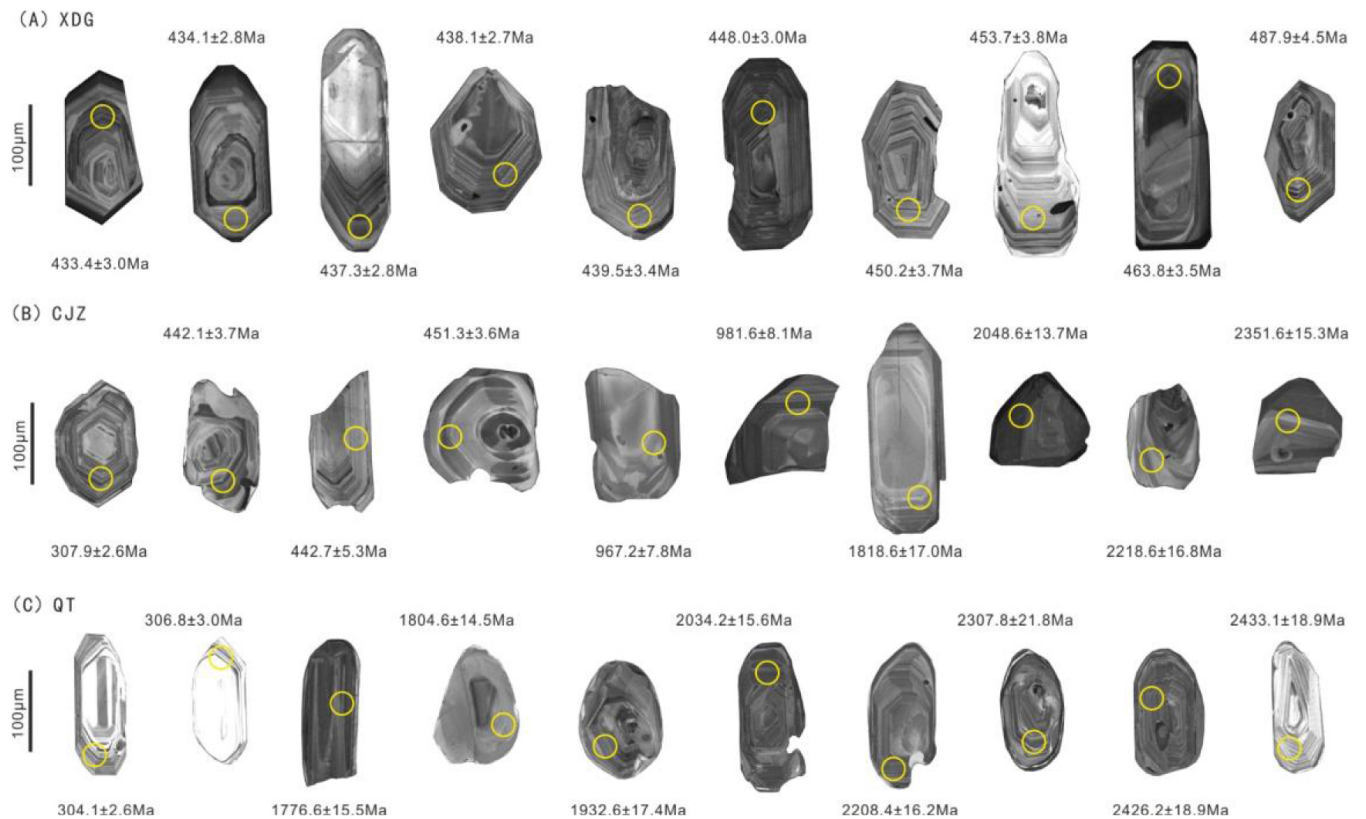


Figure 3. Images de cathodoluminescence (CL) de zircons détritiques dans des échantillons de grès prélevés dans la formation de Benxi dans le craton du nord de la Chine. Les cercles sont les cibles d'analyse.

5. Résultat de la géochronologie du zircon détritique U-Pb

5.1. Morphologie du zircon

La cathodoluminescence (CL) reflète clairement la structure interne des zircons de différentes origines. Les zircons volcaniques présentent des bandes oscillantes typiques du magma, dont la largeur peut être influencée par la température de cristallisation. La structure interne des zircons métamorphiques peut être complexe et très variable. Les zircons formés dans différentes conditions de métamorphose ont des structures internes différentes, qui comprennent une zonation nulle, une zonation faible, une zonation en éventail, une zonation plane, une zonation inégale, une zonation en éponge et une zonation en flux [Cai 2014]. Les zircons dérivés de roches sédimentaires sont généralement bien triés et abrasés à un certain degré.

Le diamètre des cristaux de zircon détritique choisis pour cette étude varie de 60 à 280 μm, la majorité d'entre eux se situant entre 90 et 140 μm. Les images de cathodoluminescence (figure 3) révèlent que la majorité des cristaux de zircon détritique ont une texture de zone oscillante évidente, et la largeur de la zone oscillante est relativement petite dans la plupart des cristaux de zircon et grande dans seulement quelques cristaux. Certaines particules de zircon présentent de larges zones oscillantes ou des propriétés de non-zones. Quelques cristaux de zircon présentent des zones d'oscillation caractéristiques irrégulières ou des zones d'exclusion, et certains présentent la structure du noyau et du manteau. Les cristaux de zircon sous la lumière transmise sont pour la plupart euédriques, de taille très variable, et présentent des bords évidents et une forme cristalline bien préservée. Quelques zircons aux grains relativement petits sont très arrondis. On peut observer une abrasion de différents degrés sur la face des cristaux de zircon. Quelques zircons sont fortement abrasés sur la face du cristal, les cristaux sont écrasés et des fractures se forment.

5.2. Les âges U-Pb du zircon

Dans cette étude, si l'âge $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ est inférieur à 1000 Ma, l'âge du zircon est égal à l'âge $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$; si l'âge $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ est supérieur à 1000 Ma, l'âge du zircon est égal à l'âge $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$. Les zircons détritiques des échantillons de grès prélevés dans la formation de Benxi montrent six âges de pointe (figures 4, 5), soit environ 310, 450, 800, 950, 1900 et 2500 Ma. Les zircons dans les échantillons de grès (CJZ, M70, Q17) prélevés dans la partie centrale du CCN présentent six pics. Les zircons dans les échantillons de grès (QT, PLG) prélevés dans la partie nord du CCN montrent des pics autour de 310, 1900, et 2500 Ma, et sans aucun pic autour de 450, 800, ou 950 Ma. Les zircons dans les échantillons de grès (XDG, ZYC, XWK, JT3, STC et S336) prélevés dans la partie sud du CCN ne contiennent pas de zircons d'environ 310 Ma, mais tous ont un pic important à environ 2500 Ma. 450 Ma.

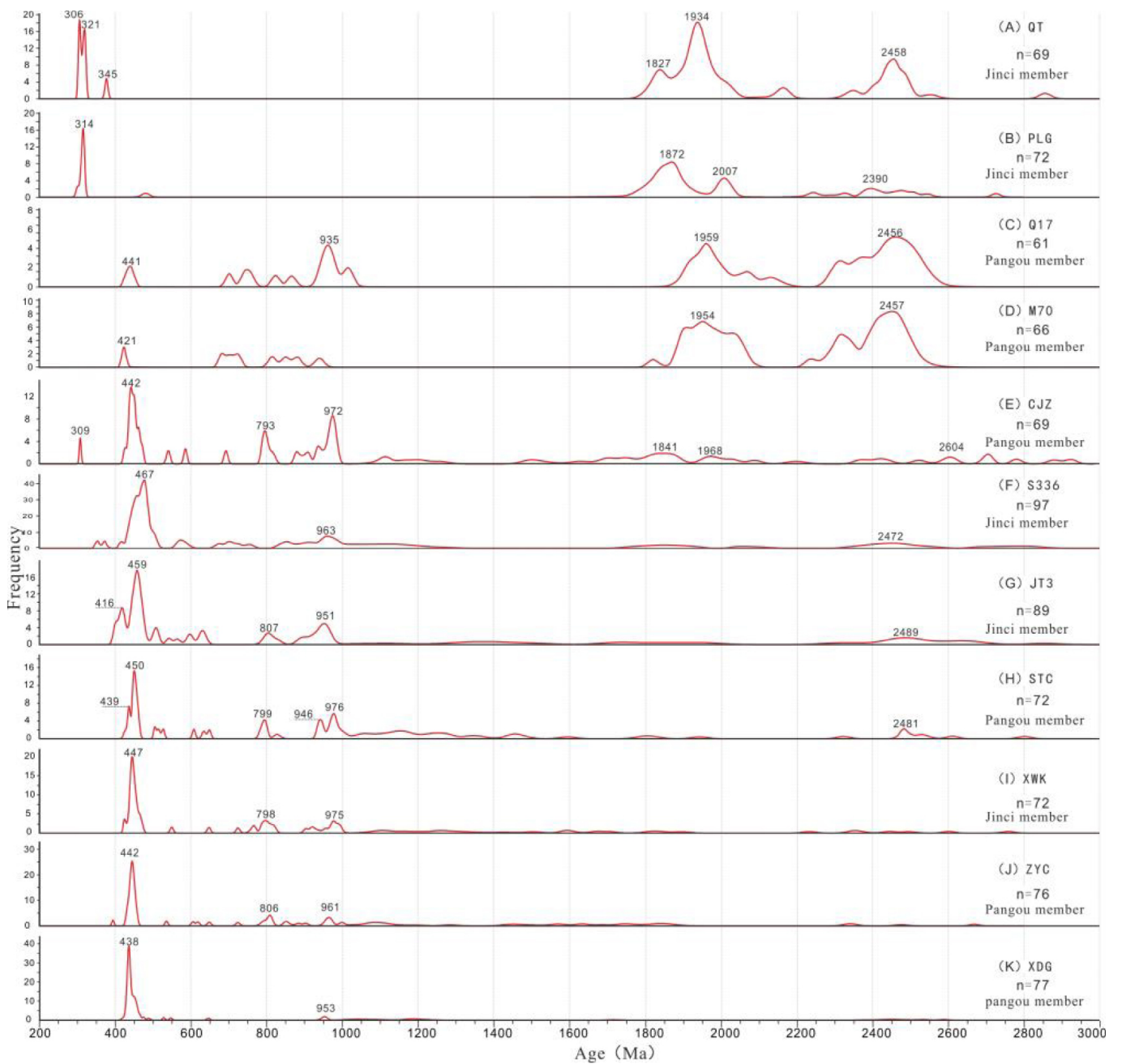


Figure 4. Histogrammes des âges U-Pb du zircon détritique pour des échantillons de grès typiques prélevés dans la formation de Benxi dans le craton du nord de la Chine. (A) Échantillons QT ; (B) PLG ; (C) Q17 ; (D) M70 ; (E) CJZ ; (F) S336 ; (G) JT3 ; (H) STC ; (I) XWK ; (J) ZYC ; et (K) XDG.

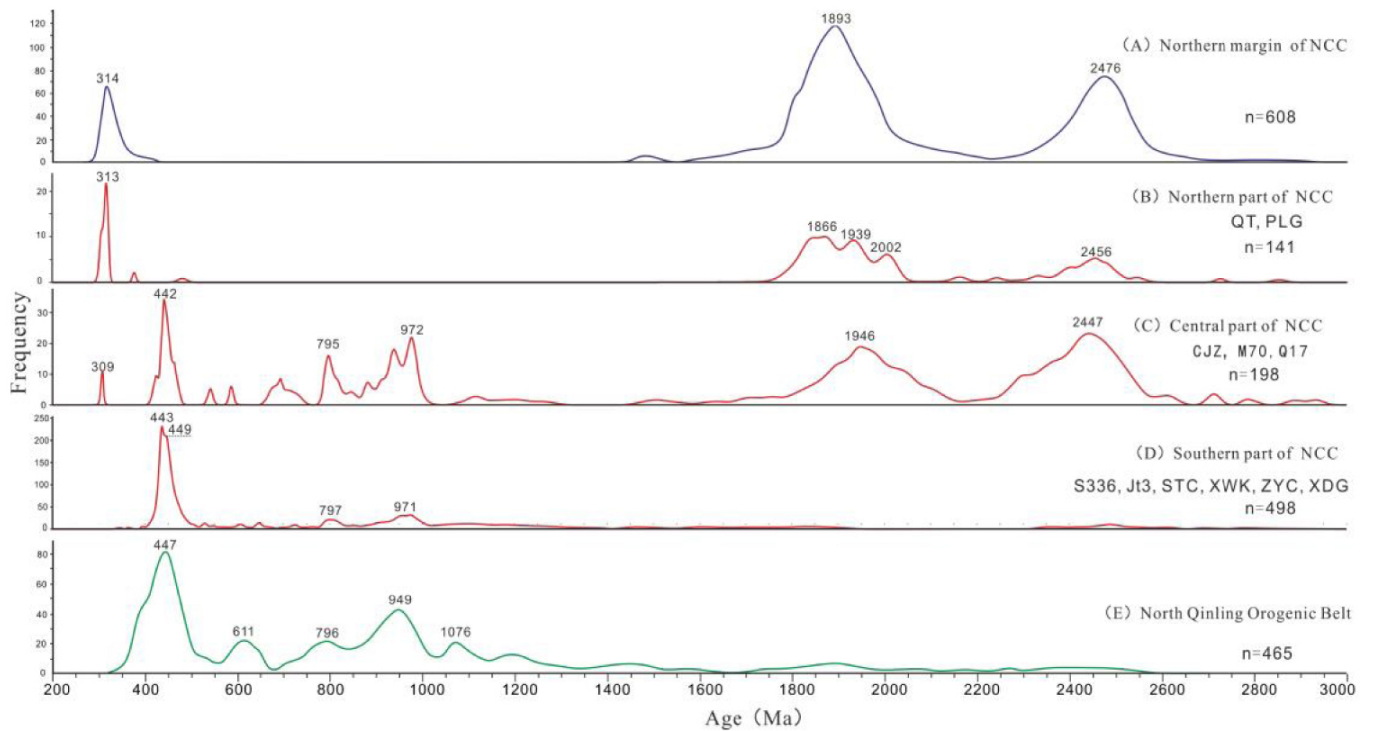


Figure 5. Comparaison des âges U-Pb du zircon pour les parties sud, centrale et nord du craton de Chine du Nord. (A) Les âges pour la marge nord du craton de Chine du Nord sont tirés de Wan et al. 2006, Zhang et al. 2007a,b, He et al. 2009. (E) Les âges pour la ceinture orogénique du Qinling du Nord sont tirés de Zhang [2008], Zhu et al. [2011] et Di Wu et al. [2010].

5.3. Isotopes Hf du zircon

Les figures 6 A, B et C illustrent les variations des valeurs de zircon détritique $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ parmi les dépôts de bauxite [Wang et al. 2016] et de grès étudiés dans le CCN. Les zircons détritiques dont l'âge U-Pb est proche de 450 Ma du CCN ont des valeurs $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ allant de +15 à -10. Les valeurs les plus élevées de $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ sont comparables à celles du manteau appauvri, ce qui suggère l'existence d'une croûte juvénile formée à environ 1 000 ans. 450 Ma dans la région d'origine des zircons détritiques. Certains grains de zircon ont des valeurs $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ fortement négatives, ce qui suggère une source formée par le remaniement d'anciens matériaux crustal. Les zircons détritiques dont l'âge maximum est d'environ 310 Ma et qui proviennent des parties nord et centrale du CCN ont une plage de valeurs $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ plutôt restreinte, allant de +2 à -10.

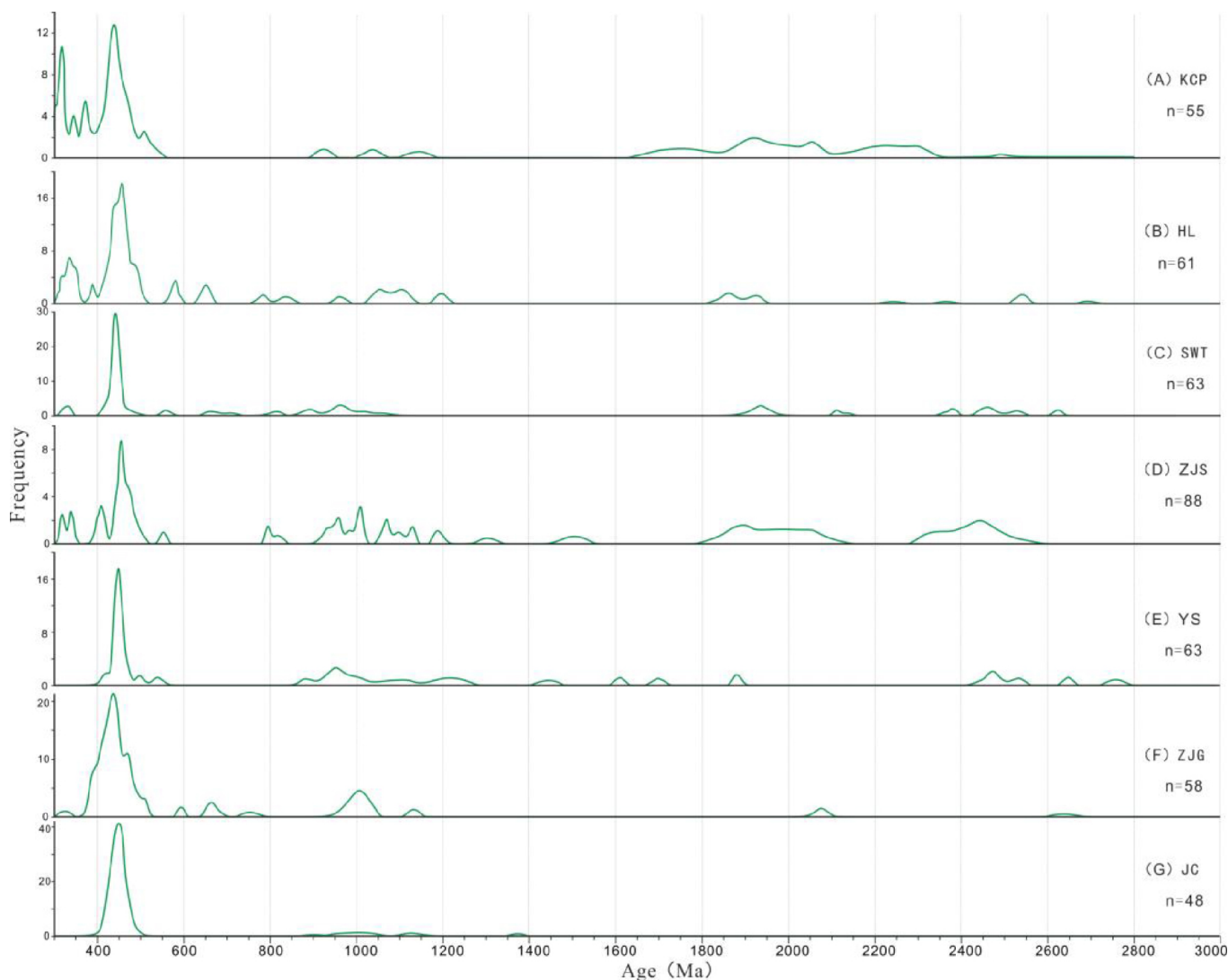


Figure 6. Histogrammes des âges U-Pb du zircon détritique pour des échantillons typiques de bauxite prélevés dans le membre hutien de la formation de Benxi dans le craton du nord de la Chine . (A) Échantillons KCP ; (B) HL ; (C) SWT ; (D) ZJS ; (E) YS ; (F) ZJG ; et (G) JC. Les âges pour KCP, HL, SWT, YS, ZJG et JC sont ceux de Cai [2014]. L'âge des ZJS est tiré de Wang et al. 2016.

6. Discussion

Quelques études antérieures [Cai 2014 ; Wang et al. 2016] ont examiné la datation U-Pb du zircon des échantillons de bauxite prélevés sur le membre hutien de la formation de Benxi dans le CCN (Figure 6). Les résultats ont indiqué que l'âge des zircons dans la bauxite culminait à environ 320, 450, 950, 1900 et 2500 Ma. Tous les échantillons ont atteint leur point culminant à environ 320, 450, 950, 1900 et 2500 Ma. La bauxite contient plus de zircons d'environ 320 Ma dans les parties centrale et nord du CCN que dans la partie sud. L'âge des zircons dans les échantillons de grès prélevés dans la partie nord du CCN a atteint un maximum d'environ 1 000 ans. 310, 1900 et 2500 Ma (figures 4, 5).

La comparaison du spectre d'âge des zircons dans la bauxite et le grès prélevés dans la formation de Benxi avec celui des roches ignées et métamorphiques de la ceinture orogénique de Qinling Nord, de l'arc de Bainaimiao et de la marge nord du CCN montre des pics vers 2500, 1900, 950, 800, 450 et 310 Ma (figure 5). L'âge des zircons détritiques dans le grès (CJZ) dans la partie centrale du CCN est d'environ 450 Ma, à l'exception d'un seul zircon d'environ 310 Ma (figure 4). Cependant, d'autres zircons d'environ 320 Ma sont présents dans la bauxite [Cai 2014 ; Wang et al. 2016] (figure 6). En revanche, les zircons détritiques des échantillons de grès (PLG et QT) prélevés dans les parties centrale et septentrionale du CCN présentent des âges de pointe clairs d'environ 310, 1900 et 2500 Ma, mais aucun âge de pointe d'environ 450 Ma (figure 4). Cependant, des zircons détritiques d'environ 320 et 450 Ma sont présents dans la bauxite [Cai 2014 ; Wang et al. 2016] (Figure 6). Ces différences suggèrent que la provenance de la formation de Benxi peut varier d'un endroit à l'autre du CCN.

6.1. Origine des zircons détritiques

Les zircons dans les échantillons de roche prélevés dans la ceinture orogénique de Qinling Nord montrent trois âges de pointe de 400-500 Ma, 750-850 Ma, 900-1000 Ma, et aucun âge de pointe de 300-330 Ma, 1800-2000 Ma, et 2300-2600 Ma (figure 5). Les zircons détritiques de la formation de Benxi (y compris le grès et la bauxite), dont les âges maximaux sont d'environ 1900 et 2500 Ma, prélevés dans les parties centrale et septentrionale du CCN, présentent des valeurs $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ similaires à celles des zircons formés à la même époque dans la marge nord du CCN (figure 7). Cela suggère que les zircons détritiques de la formation de Benxi proviennent de la marge nord du CCN, et que la marge nord du CCN a commencé à se soulever au Carbonifère supérieur.

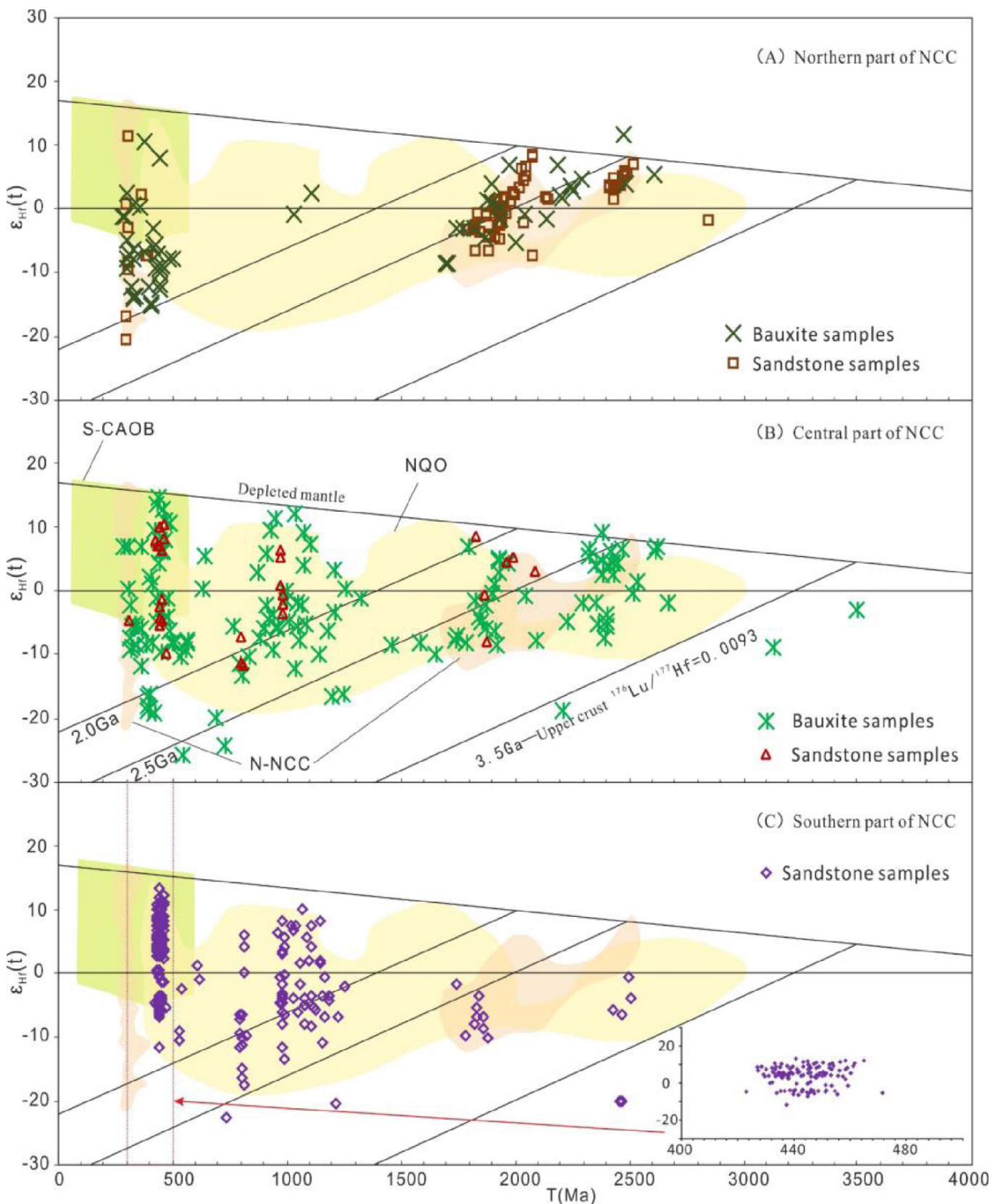


Figure 7. Graphique de $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ en fonction de l'âge (Ma) pour les zircons détritiques dans les échantillons de bauxite et de grès de la formation de Benxi dans le craton du nord de la Chine. Les données pour les échantillons de bauxite sont tirées de Wang et al. 2016. Les plages $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ de zircons détritiques provenant de régions sources possibles sont également indiquées. Les données relatives à la S-CAOB (partie la plus méridionale de la ceinture orogénique d'Asie centrale) et à la marge nord du CCN (craton de Chine du Nord) proviennent de Yang et al. [2006] et Zhang et al. [2007a,b], et celles relatives à la NQO (ceinture orogénique de Qinling du Nord) proviennent de Shi et al. [2013a,b].

Un magmatisme d'environ 800 et 950 Ma est contenu dans la ceinture orogénique de Qinling Nord. Les zircons détritiques de la formation de Benxi, dont l'âge maximum est d'environ 800 et 950 Ma, partagent des caractéristiques similaires $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ avec les zircons ignés et métamorphiques formés à la même période et provenant de la ceinture orogénique de North Qinling (figure 7), ce qui suggère que ce type de zircon provient de la ceinture orogénique de North Qinling.

L'âge maximum d'environ 450 Ma existe dans tous les échantillons de bauxite prélevés sur le membre hutien de la formation de Benxi dans le CCN. Dans les échantillons de grès (Pangou, membre de la Jinci), seul le pic d'âge d'environ 450 Ma existe dans la

partie centrale sud du CCN, mais pas dans la partie nord, ce qui indique que la paléotopographie de la plaque intercontinentale du CCN a considérablement changé. Les roches ignées paléozoïques formées dans la ceinture orogénique Qinling Nord montrent $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ des valeurs de +15 à -10 et l'âge de pointe des zircons dans les roches ignées paléozoïques varie de 400 à 500 Ma (figure 7), avec un pic à 450 Ma, ce qui indique que l'apparition de la subduction pendant 400-500 Ma a entraîné la reconstruction de l'ancienne croûte et la formation d'une croûte plus jeune. Les zircons dont l'âge maximal est de 400-500 Ma, prélevés dans les roches ignées du Paléozoïque de la ceinture orogénique de Qinling Nord, ont des valeurs $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ allant de négatives à positives. À l'inverse, la majorité des zircons du même âge de pointe prélevés dans des roches intrusives et sédimentaires de la partie méridionale de la ceinture orogénique d'Asie centrale sont positifs (figure 7), ce qui est très différent de ceux des zircons détritiques contemporains prélevés dans la formation du Benxi du Carbonifère. En conséquence, la majorité des zircons détritiques ayant atteint leur âge maximum d'environ 450 Ma dans la formation de Benxi proviennent de la ceinture orogénique de Qinling Nord, plutôt que de l'arc de Bainaimiao dans la partie sud de la ceinture orogénique d'Asie centrale. Il est très probable que ces zircons ont été transportés par des processus hydrodynamiques plutôt que par une éruption volcanique. Lors de la collision entre l'arc de Qinling Nord et la marge sud du craton de Chine du Nord (>430 Ma), le bassin de l'arc Erlangping a été soulevé et érodé, et les roches intrusives du bassin ont également été altérées et érodées, ce qui a fourni des zircons détritiques pour le dépôt du craton de Chine du Nord [Cai 2014].

Les roches ignées du Carbonifère supérieur se sont rarement développées dans la ceinture orogénique de Qinling Nord, mais elles étaient couramment présentes dans la marge nord du CCN. Les ca. 310 Ma provenant de la formation de Benxi dans les parties centrale et septentrionale du CCN ont des valeurs similaires $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ à celles des roches ignées de la même période dans la marge nord du CCN, qui sont pour la plupart négatives (figure 7). Cela suggère que les valeurs d'environ 310 Ma de zircons détritiques proviennent de la marge nord du CCN et pourraient être transportés par des processus hydrodynamiques en raison de la grande distance entre la provenance et le dépôt final.

6.2. Cadre tectonique-dépositionnel

La dérivation déduite de l'indice ca. 450 Ma de zircons détritiques dans les dépôts de bauxite de la ceinture orogénique de Qinling Nord à travers le CCN implique que la surface du craton avait une topographie générale plongeant vers le nord et une montagne proéminente le long de la marge sud du craton [Wang et al. 2016]. La ceinture orogénique de ca. 450 Ma dans les échantillons de grès prélevés sur les membres Jinci et Pangou de la formation de Benxi n'existent que dans les parties sud et centrale du CCN, mais pas dans la partie nord du CCN. Les échantillons de bauxite et de grès prélevés dans les parties nord et centrale du CCN sont riches en zircons détritiques d'environ 320 Ma [Cai 2014 ; Wang et al. 2016] et d'environ 310 Ma. Cela indique que la surface de la partie nord du CCN est passée d'une topographie de pendage nord à une topographie de pendage sud en raison de l'effet du soulèvement rapide de la marge nord.

En réponse à la topographie plongeant vers le sud, les produits altérés par les intempéries dans la marge nord du CCN ont commencé à migrer vers le sud. Par conséquent, les changements dans la source de ces zircons détritiques se sont produits au cours de la période sédimentaire tardive du membre hutien de la formation Benxi du Carbonifère supérieur.

La CCN a connu un hiatus sédimentaire d'environ 150 Ma entre l'Ordovicien moyen et le Carbonifère supérieur. Par conséquent, l'arc de Qinling Nord et l'arc de Bainaimiao sont moins susceptibles de se développer directement à la marge du CCN. Il est très probable que ces arcs fassent en fait partie du système d'arc distal du Paléozoïque ou du terrane d'arc de dérive qui a coexisté avec le craton en marge de celui-ci au Carbonifère supérieur. Le bassin de l'arrière-arc d'Erlangping du Paléozoïque est présent entre l'arc Qinling Nord et le CCN, ce qui révèle sa cohérence avec les terranes d'arcs du Paléozoïque et suggère que la collision entre ces terranes d'arcs et le CCN s'est produite avant 430 Ma environ. L'évolution structurelle de la ceinture orogénique d'Asie centrale méridionale est conforme à un modèle orogénique multiple alternatif [Zhang et al. 2018]. Au Paléozoïque précoce, un système de tranchées-arc (500-410 Ma) s'est développé dans le Paléo-Asie-Océan, et l'arc de Bainaimiao s'est formé. Au Dévonien, la fermeture du Paléo-Asie-Océan a conduit à l'orogénèse de collision (environ 400 Ma), et à la collision entre l'arc de Bainaimiao et le CCN. Au Carbonifère-Permien, l'extension intracontinentale a entraîné la formation de bassins océaniques limités (350-250 Ma). L'arc de Bainaimiao a été réactivé et le magmatisme lié à l'extension a été largement développé. Au début du Trias moyen, la fermeture passive du bassin océanique limité a entraîné une orogénèse intraplaque (environ 240 Ma).

Avant le Dévonien, les marges nord et sud du CCN constituaient la marge continentale active, qui était bordée au sud par l'arc de Qinling Nord et au nord par l'arc de Bainaimiao dérivant vers le sud. La convergence de ces systèmes de terrane de l'arc paléozoïque et du CCN s'est produite pendant la période sédimentaire tardive du membre hutien de la formation du Benxi du Carbonifère (environ 310 Ma), entraînant un changement significatif de la topographie sur toute la plaque intracontinentale. Sur la base des résultats d'analyse de la cathodoluminescence des graviers et des minéraux légers [Jia et al. 2019], de la paléogéographie des lithofaciès [Chen et al. 2010 ; Hou et al. 2018 ; Shao et al. 2014], de l'unité de paléotopographie sur la surface paléoérosionnelle [Gan 1984 ; Lü et al. 2010], et des événements de transgression marine [Wu et al. 1995 ; Chen 1998] pour la formation de Benxi dans le CCN, la ceinture orogénique de Qinling Nord au cours de la première période sédimentaire de la formation de Benxi, le membre hutien a été soulevé et érodé rapidement et s'est développé en une provenance majeure ; la paléotopographie a été soulevée vers le sud et plongée vers le nord (figure 8a). De la fin de la période sédimentaire du membre hutien (figure 8b) à la période sédimentaire des membres de Pangou (figure 9a) et de Jinci (figure 9b), l'inversion structurelle a permis à la marge nord du CCN de se soulever et de s'éroder rapidement, la paléotopographie était ascendante vers le nord et plongeante vers le sud, et deux provenances distinctes étaient présentes dans les sédiments de la Formation de Benxi. Les sédiments ont été fournis principalement par la provenance du nord (figure 9).

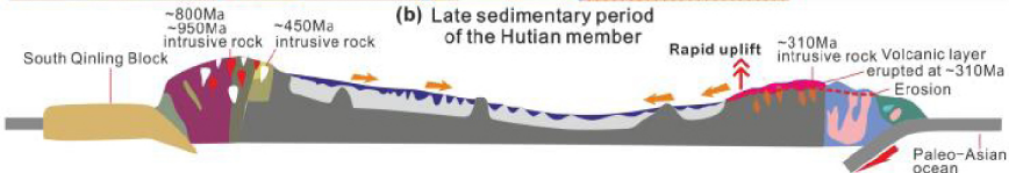
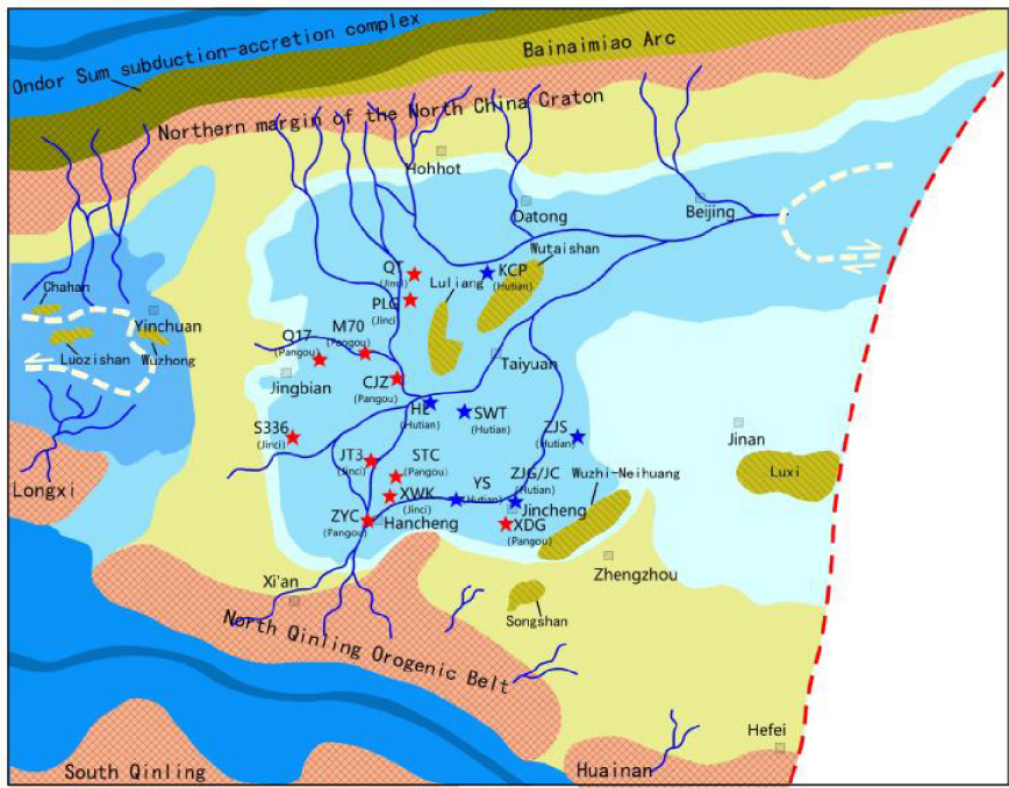
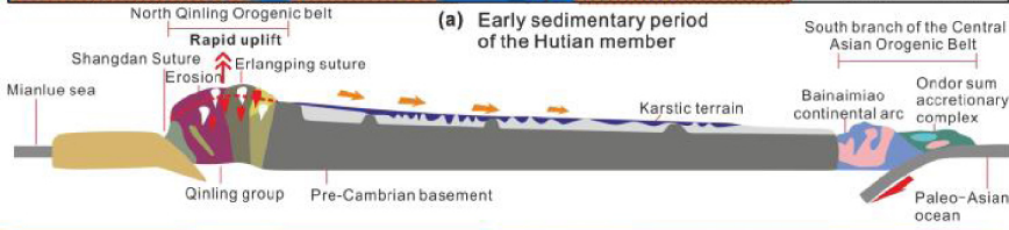
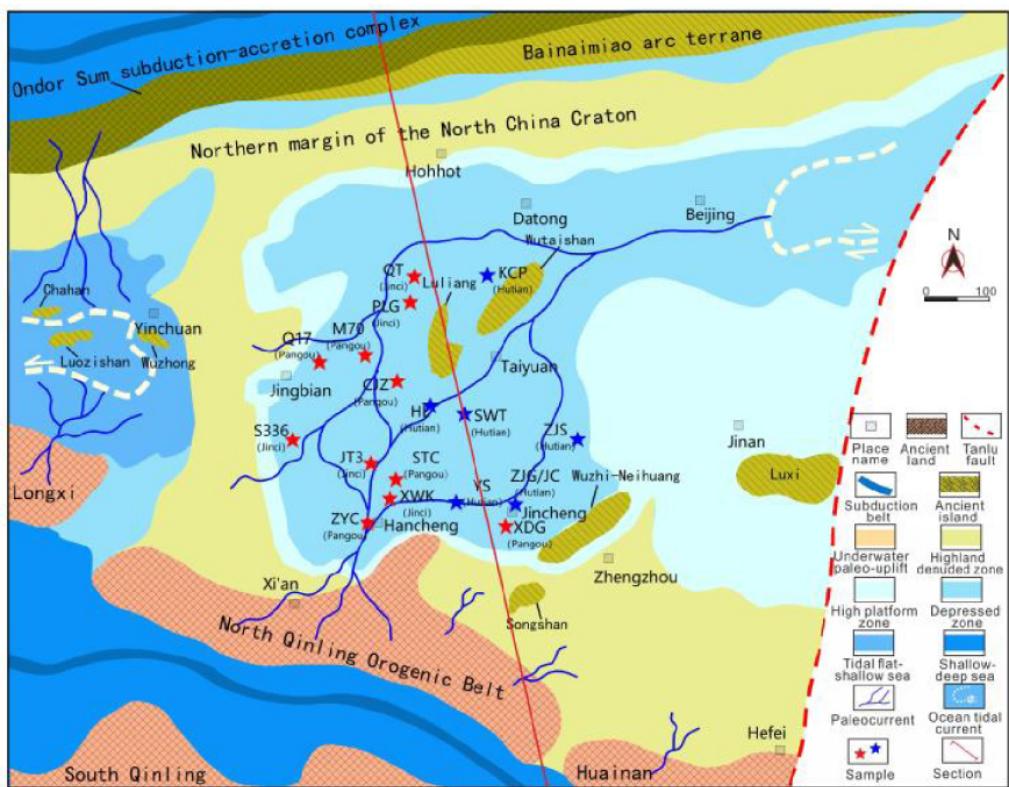


Figure 8. Modèle proposé pour l'évolution tectonique et les changements paléogéographiques associés dans le craton de Chine du Nord pendant la période sédimentaire du membre de Hutian (Formation de Benxi). (a) Montre que la partie nord de la ceinture orogénique de Qinling s'est rapidement soulevée et que la paléotopographie du craton de

Chine du Nord a plongé vers le nord. Cela a entraîné l'apport de matériaux altérés par les intempéries de la ceinture orogénique de Qinling Nord au craton de Chine Nord. (b) Montre que l'inversion structurelle a permis à la marge nord du craton de Chine du Nord de se transformer en une plongée vers le sud. Modèle de coupe transversale géologique révisé d'après Wang et al (2016). Les systèmes fluviaux et les courants de marée dans les diagrammes paléogéographiques révisés d'après Wu et al. 1995, Chen 1998, Chen et al. 2010, Guo et al. 2010, Shao et al. 2014 et Hou et al. 2018. Les unités de paléotopographie sur la surface paléoérosionnelle ont été révisées d'après Gan [1984] et [Lü et al. 2010].

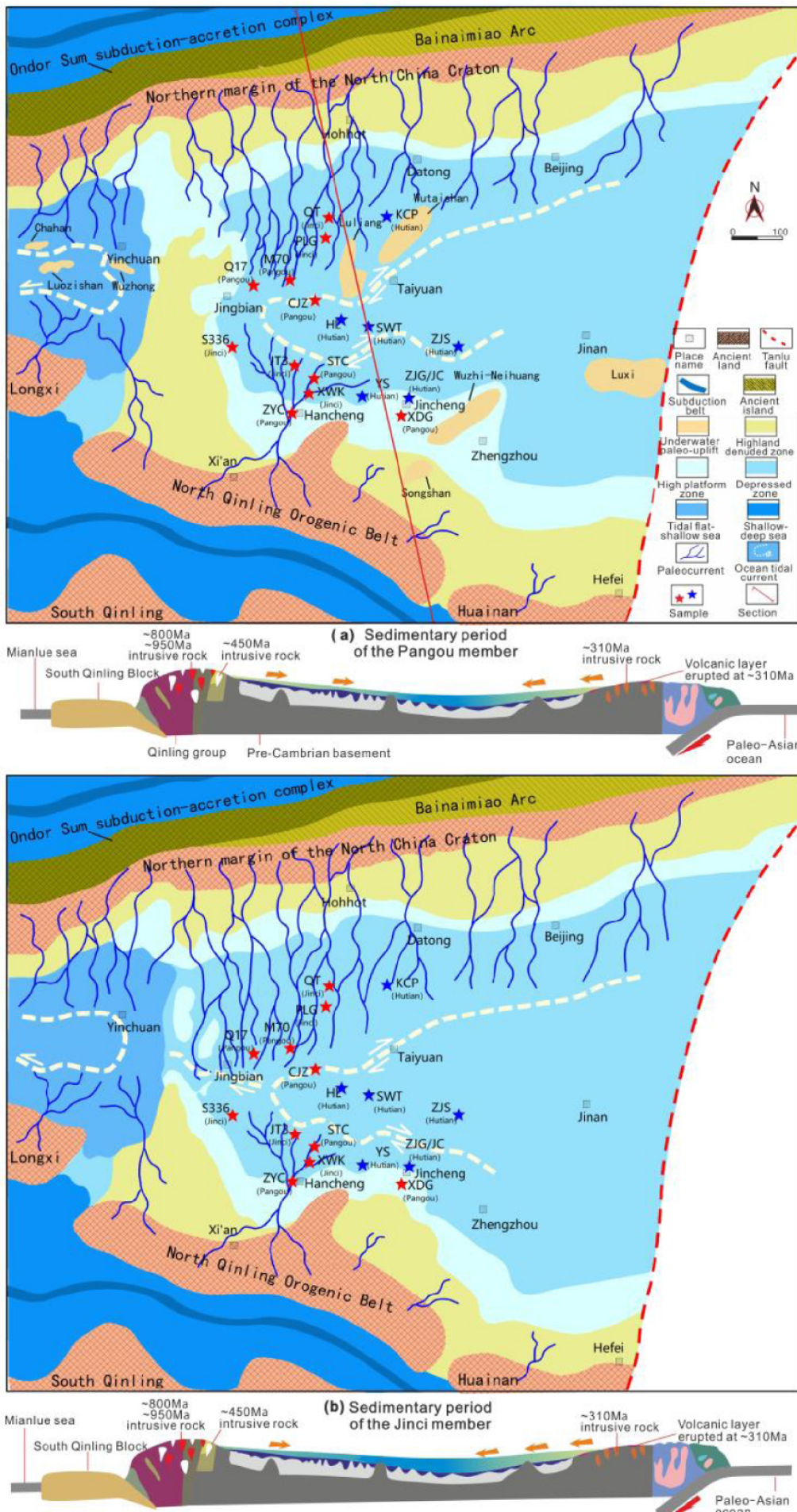


Figure 9. Modèle proposé pour l'évolution tectonique et les changements paléogéographiques associés dans le Craton de Chine du Nord pendant la période sédimentaire des membres de Pangou-Jinci (Formation de Benxi). (a) et (b) montrent que la marge nord du craton de Chine du Nord s'est encore soulevée, ce qui a induit l'apport de matériaux altérés de la ceinture orogénique de Qinling du Nord et de la marge nord du craton de Chine du Nord au craton de Chine du Nord. Modèle de coupe transversale géologique révisé d'après Wang et al. 2016. Les systèmes fluviaux et

les courants de marée dans les diagrammes paléogéographiques révisés d'après Wu et al. 1995, Chen 1998, Chen et al. 2010, Guo et al. 2010, Shao et al. 2014 et Hou et al. 2018. Les unités de paléotopographie sur la surface paléocéanographique ont été révisées d'après Gan [1984] et Lü et al. [2010].

7. Conclusions

Les sédiments du Carbonifère supérieur de la formation de Benxi dans le craton de Chine du Nord (CCN) ont deux provenances distinctes. Au début de la période sédimentaire du membre hutien de la formation de Benxi, la ceinture orogénique de Qinling Nord a été rapidement soulevée, et les sédiments du CCN provenaient principalement de la ceinture orogénique de Qinling Nord. De la fin de la période sédimentaire du membre hutien à la période sédimentaire du membre Jinci, l'inversion structurale a permis à la marge nord du CCN de se soulever rapidement, la paléotopographie a remonté vers le nord et a plongé vers le sud. L'arc de Bainaimiao a été réactivé, ce qui a entraîné le changement paléotopographique associé dans le grand bassin intérieur du Paléozoïque. Les sédiments de la formation de Benxi dans le CCN ont été fournis principalement par la provenance nord.

Bibliographie

- [Blichert-Toft and Albarède, 1997] J. Blichert-Toft; F. Albarède The Lu-Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Volume 148 (1997), pp. 243-258
- [Cai, 2014] S. H. Cai, 2014 (Detrital zircon geochronology and its implications. The Carboniferous bauxite deposits in the North China Craton. Master Thesis, China University of Geosciences China: 1–57 (in Chinese with English abstract))
- [Cawood et al., 2012] P. A. Cawood; C. J. Hawkesworth; B. Dhuime Detrital zircon record and tectonic setting, *Geology*, Volume 40 (2012), pp. 875-878
- [Chen et al., 2007] J. L. Chen; H. B. Li; H. L. Wang; S. P. He; Z. X. Zeng; X. Y. Xu; X. M. Li LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of a quartz diorite pluton from Wangjiacha, the junction area between the Qinling and Qilian orogenic belts and its tectonic significance, *J. Jilin Univ. (Earth Science Edition)*, Volume 37 (2007), pp. 423-431
- [Chen et al., 2010] Q. H. Chen; K. Y. Li; D. F. Zhang; S. L. Jin; Y. Q. Guo; J. G. Pang; Z. Yuan The relationship between fan delta and hydrocarbon accumulation in Benxi-Taiyuan Formation, Ordos Basin, *Geol. China*, Volume 37 (2010) no. 2, pp. 421-429 ((in Chinese, with English abstract))
- [Chen, 1998] S. Y. Chen The controls of the collisional orogenesis in the Qinling Mountains on the Carboniferous-Permian transgressional processes in North China, *Sedimentary Facies Palaeogeogr.*, Volume 18 (1998) no. 2, pp. 48-54 ((in Chinese, with English abstract))
- [Deng et al., 2010] J. Deng; Q. F. Wang; S. J. Yang; X. F. Liu; Q. Z. Zhang; L. Q. Yang; Y. H. Yang Genetic relationship between the Emeishan plume and the bauxite deposits in western Guangxi, China: constraints from U-Pb and Lu-Hf isotopes of the detrital zircons in bauxite ores, *J. Asian Earth Sci.*, Volume 37 (2010), pp. 412-424
- [De Jong et al., 2006] K. De Jong; W. J. Xiao; B. F. Windley; H. Masago; C. H. Lo Ordovician ⁴⁰Ar/³⁹Ar phengite ages from the blueschist-facies Ondor Sum subduction-accretion complex (Inner Mongolia) and implications for the early Palaeozoic history of continental blocks in China and adjacent areas, *Am. J. Sci.*, Volume 306 (2006), pp. 799-845
- [Di Wu et al., 2010] C. R. Di Wu; Y. Sun; C. L. Lin; C. L. Lin; H. L. Wang LA-(MC)-ICPMS U-Pb zircon geochronology and Lu-Hf isotope compositions of the Taihua complex on the southern margin of the North China Craton, *Sci. Bull.*, Volume 55 (2010) no. 23, pp. 2557-2571
- [Faure et al., 2007] M. Faure; P. Trap; W. Lin; P. Monié; O. Bruguier Polyorogenic evolution of the Paleoproterozoic Trans-North China Belt—New insights from the Lüliangshan-Hengshan-Wutaishan and Fuping massifs, *Episodes*, Volume 30 (2007) no. 2, pp. 96-107
- [Gan, 1984] D. Q. Gan Analysis of mineralization of sedimentary bauxites of the North China platform, *Acta Sedimentologica Sin.*, Volume 2 (1984) no. 2, pp. 67-79 ((in Chinese, with English abstract))
- [Guo et al., 2010] C. L. Guo; D. L. Chen; W. Fan; A. G. Wang Geochemical and zircon U-Pb chronological studies of the Manziying granite in Erlangping area, western Henan province, *Acta Petrol. Et Mineral.*, Volume 29 (2010), pp. 15-22 ((in Chinese, with English abstract))
- [He et al., 2009] Y. H. He; G. C. Zhao; M. Sun; X. P. Xia SHRIMP and LA-ICP-MS zircon geochronology of the Xiong'er volcanic rocks: implications for the Paleo-Mesoproterozoic evolution of the southern margin of the North China Craton, *Precambrian Res.*, Volume 168 (2009) no. 3–4, pp. 213-222
- [Hou et al., 2018] Y. D. Hou; A. Q. Chen; W. B. Zhao; G. D. Dong; S. Yang; S. L. Xu; Z. D. Gao; F. X. Li; X. X. Liu; X. X. Zhang Analysis on the depositional environment of Carboniferous Benxi Formation tidal-delta sand body complex, Ordos Basin, China, *J. Chendu Univ. Technol. (Science & Technology Edition)*, Volume 45 (2018) no. 4, pp. 393-401 ((in Chinese, with English abstract))
- [Hu et al., 2012] Z. C. Hu; Y. S. Liu; S. Gao; W. G. Liu; L. Yang; W. Zhang; X. R. Tong; L. Lin; K. Q. Zong; M. Li; H. H. Chen; L. Zhou Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and Jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS, *J. Anal. At. Spectrom.*, Volume 27 (2012), pp. 1391-1399 ((in Chinese, with English abstract))
- [Jia et al., 2019] L. B. Jia; D. K. Zhong; H. T. Sun; R. T. Yan; C. L. Zhang; W. L. Mo; C. Qiu; Y. Dong; B. Li; G. X. Liao Sediment provenance analysis and tectonic implication of the Benxi Formation, Ordos Basin, *Acta Sedimentologica Sin.*, Volume 37 (2019) no. 5, pp. 1087-1103 ((in Chinese, with English abstract))
- [Jiang et al., 2009] S. H. Jiang; F. J. Nie; D. H. Fang; Y. F. Liu Geochronology and geochemical features of the main intrusive rocks in the Weishancheng area, Tongbai County, Henan, *Acta Geol. Sin.*, Volume 83 (2009), pp. 11-1029 ((in Chinese, with English abstract))
- [Lerch et al., 1995] M. F. Lerch; F. Xue; A. Kroner A Paleozoic magmatic arc in the Heihe area, Qinling orogenic belt, central China, *J. Geol.*, Volume 103 (1995), pp. 437-449

- [Li et al., 2008] N. Li; Y. L. Sun; J. Li; L. W. Xue; W. B. Li Molybdenite Re-Os isotope age of the Dahu Au-Mo deposit, Xiaolinling and the Indosinian mineralization, *Acta Petrol. Sin.*, Volume 24 (2008), pp. 810-816 ((in Chinese, with English abstract))
- [Li et al., 2012] W. B. Li; R. C. Zhong; C. Xu; B. Song; W. J. Qu U-Pb and Re-Os geochronology of the Bainaimiao Cu-Mo-Au deposit, on the northern margin of the North China Craton, North Asia Orogenic Belt: implications for ore genesis and geodynamic setting, *Ore Geol. Rev.*, Volume 48 (2012), pp. 139-150
- [Li et al., 2014] Y. Li; J. W. Zhang; J. Li; J. He; G. M. Sun; Y. L. Qiao A study on sedimentary microfacies of Benxi Formation and its controlling effect on gas enrichment in Yanchang district of Ordos Basin, *Northwestern Geol.*, Volume 47 (2014) no. 2, pp. 216-222 ((in Chinese, with English abstract))
- [Li, 2011] Y. Li, 2011 (Paleozoic ophiolites and tectonic evolution of the North Qinling. Master Thesis, Chinese Academy of Geological Science; 1–140 (in Chinese, with English abstract). *Ore Geology Reviews*)
- [Liu et al., 2007] J. F. Liu; Y. Sun; H. Zhang Zircon age of Luohansi group in the northern Qinling and their geological significance, *J. Northwest Univ. (Natural Science Edition)*, Volume 37 (2007) no. 6, pp. 907-911 ((in Chinese, with English abstract))
- [Lu et al., 2003] S. N. Lu; H. K. Li; Z. H. Chen; G. J. Hao; H. Y. Zhou; J. J. Guo; G. H. Niu; Z. Q. Xiang Meso-Neoproterozoic Geological Evolution of the Qinling and its Response to Rodinia Event, Geological Publishing House, Beijing, 2003, pp. 1-167
- [Lü et al., 2010] D. W. Lü; X. W. Wei; H. Y. Liu; B. B. Liu Classification of paleogeomorphology units and law of coal accumulation in Late Carboniferous of the North China Plate, *Petrol. Geol. Recovery Efficiency*, Volume 17 (2010) no. 5, pp. 24-28 ((in Chinese, with English abstract))
- [Mattauer et al., 1985] M. Mattauer; P. Matte; J. Malavielle; P. Tapponnier; H. Maluski; Z. Q. Xu; Y. L. Lu; Y. Q. Tang Tectonics of Qinling belt: built-up and evolution of eastern Asia, *Nature*, Volume 317 (1985), pp. 496-500
- [Meng and Zhang, 2000] Q. R. Meng; G. W. Zhang Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China, *Tectonophysics*, Volume 323 (2000), pp. 183-196 ((in Chinese, with English abstract))
- [Pei et al., 2007] X. Z. Pei; Z. Q. Liu; S. P. Ding; Z. C. Li; G. Y. Li; R. B. Li; F. Wang; F. J. Li Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the Gabbro from the Baihua igneous complex in Tianshui area, eastern Gansu, and its geological significance, *Adv. Earth Sci.*, Volume 22 (2007), pp. 818-827
- [Scherer et al., 2001] E. Scherer; C. Münker; K. Mezger Calibration of the lutetium-hafnium clock, *Science*, Volume 293 (2001), pp. 683-687
- [Shao et al., 2014] L. Y. Shao; D. X. Dong; M. P. Li; H. S. Wang; D. D. Wang; J. Lu; M. Q. Zheng; A. G. Cheng Sequence-paleogeography and coal accumulation of the Carboniferous-Permian in the North China, *J. China Coal Geol.*, Volume 39 (2014) no. 8, pp. 1725-1733 ((in Chinese, with English abstract))
- [Shi et al., 013a] G. Z. Shi; M. Faure; B. Xu; P. Zhao; Y. Chen Structural and kinematic analysis of the Early Paleozoic Ondor Sum-Hongqimelange belt, eastern part of the Altaids (CAOB) in Inner Mongolia, China, *J. Asian Earth Sci.*, Volume 66 (2013a), pp. 123-139
- [Shi et al., 013b] Y. Shi; J. H. Yu; M. Santosh Tectonic evolution of the Qinling orogenic belt, Central China: new evidence from geochemical, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes, *Precambrian Res.*, Volume 231 (2013b), pp. 19-60
- [Sun, 1991] Y. Sun The ancient ocean and Caledonian orogeny in the East Qinling, *Geol. Rev.*, Volume 37 (1991), pp. 555-559
- [Tian, 2003] W. Tian The Regional Petrogenesis of Granitic Rocks From Eastern Qinling and its Implication to the Tectonic Environment, Peking University, 2003, pp. 1-112
- [Wan et al., 2006] Y. S. Wan; B. Song; D. Y. Liu; S. A. Wilde; J. S. Wu; Y. R. Shi; X. Y. Yin; H. Y. Zhou SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event, *Precambrian Res.*, Volume 149 (2006) no. 3–4, pp. 249-271
- [Wang et al., 2009] T. Wang; X. X. Wang; W. Tian; C. L. Zhang; W. P. Li; S. Li North Qinling Paleozoic granite associations and their variation in space and time: implications for orogenic processes in the orogens of central China, *Sci. China (Series D)*, Volume 52 (2009), pp. 1359-1384 ((in Chinese, with English abstract))
- [Wang et al., 2016] Q. F. Wang; J. Deng; X. F. Liu; R. Zhao; S. H. Cai Provenance of Late Carboniferous bauxite deposits in the North China Craton: new constraints on marginal arc construction and accretion processes, *Gondwana Res.*, Volume 38 (2016), pp. 86-98
- [Wen et al., 2008] Z. L. Wen; X. Y. Xu; R. F. Zhao; F. Wang; W. Hu Geologic and geochemical features of Devonian granites in Dangchuan area, Western Qinling, and its tectonic significance, *Geol. Rev.*, Volume 54 (2008), pp. 827-836 ((in Chinese, with English abstract))
- [Wu et al., 1995] F. D. Wu; Z. H. Chen; S. L. Zhang; L. G. Ge Marine transgression during Carboniferous-Permian in the North China Craton, *Geoscience*, Volume 9 (1995) no. 3!, pp. 284-291 ((in Chinese, with English abstract))
- [Xu et al., 2008] X. Y. Xu; S. P. He; H. L. Wang; E. P. Zhang; J. L. Chn; J. M. Sun Tectonic framework of North Qinling Mountain and North Qilian Mountain conjunction area in Early Paleozoic: a study of the evidences from strata and tectonic magmatic events, *Northwestern Geol.*, Volume 41 (2008), pp. 1-21 ((in Chinese, with English abstract))
- [Xu et al., 2013] B. Xu; J. Charvet; Y. Chen; P. Zhao; G. Z. Shi Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt, *Gondwana Res.*, Volume 23 (2013) no. 4, pp. 1342-1364
- [Xue et al., 1996] F. Xue; A. Kröner; T. Reischmann; M. F. Lerch Palaeozoic pre- and post-collision calc-alkaline magmatism in the Qinling orogenic belt, central China, as documented by zircon ages on granitoid rocks, *J. Geol. Soc.*, Volume 153 (1996), pp. 409-417
- [Yan et al., 2007] Q. R. Yan; J. L. Chen; Z. Q. Wang; Z. Yan; T. Wang; Q. G. Li; Z. Q. Zhang; C. F. Jiang Tectonic setting and SHRIMP age of volcanic rocks in the Xieyuguan and Caotangou Group: implications for the North Qinling orogenic belt, *Acta Geol. Sin.*, Volume 81 (2007), pp. 488-500 ((in Chinese, with English abstract))

- [Yang et al., 2006] Z. Yang; Y. P. Dong; X. M. Liu; J. H. Zhang LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of gabbro in the Guanzizhen ophiolite, Tianshui, West Qinling, China, *Chin. Sci. Bull.*, Volume 25 (2006), pp. 1321-1325
- [Zhai, 2007] M. G. Zhai Paleoproterozoic events in the North China Craton, *Acta Petrologica Sin.*, Volume 23 (2007) no. 11, pp. 2665-2682 ((in Chinese, with English abstract))
- [Zhang et al., 2004] S. H. Zhang; Y. Zhao; B. Song; H. Wu The late Paleozoic gneissic granodiorite pluton in Early Pre-Cambrian high-grade metamorphic terrains near Longhua county in northern Hebei province, North China: result from zircon SHRIMP U-Pb dating and its tectonic implications, *Acta Petrologica Sin.*, Volume 20 (2004), pp. 621-626 ((in Chinese with English abstract))
- [Zhang et al., 006a] S. H. Zhang; Y. Zhao; B. Song Hornblende thermobarometry of the Carboniferous granitoids from the Inner Mongolia Paleoplift: implications for the tectonic evolution of the northern margin of North China block, *Mineral. Petrol.*, Volume 87 (2006a), pp. 123-141
- [Zhang et al., 006b] S. H. Zhang; Y. Zhao; B. Song Isotopic Geochronology and Geochemistry of Ophiolites, Granites and Clastic Sedimentary Rocks in the Qinling Orogenic Belt, Geological Publishing House, Beijing, 2006b, pp. 1-213 ((in Chinese, with English abstract))
- [Zhang et al., 007a] S. H. Zhang; Y. Zhao; B. Song; Z. Y. Yang; J. M. Hu; H. Wu Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: implications for a late Paleozoic active continental margin, *J. Geol. Soc.*, Volume 164 (2007a), pp. 451-463
- [Zhang et al., 007b] S. H. Zhang; Y. Zhao; B. Song; Y. H. Yang Zircon SHRIMP U-Pb and in-situ Lu-Hf isotope analyses of a tuff from western Beijing: evidence for missing Late Paleozoic arc volcano eruptions at the northern margin of the North China block, *Gondwana Res.*, Volume 12 (2007b), pp. 157-165
- [Zhang et al., 2011] X. H. Zhang; Q. Mao; H. F. Zhang; M. G. Zhai; Y. H. Yang; Z. C. Hu Mafic and felsic magma interaction during the construction of high-K calcalkaline plutons within a metacratonic passive margin: the Early Permian Guyang batholith from the northern North China Craton, *Lithos*, Volume 125 (2011), pp. 569-591
- [Zhang et al., 2018] J. R. Zhang; C. J. Wei; H. Chu New model for the tectonic evolution of Xing'an-Inner Mongolia Orogenic Belt: evidence from four different phases of metamorphism in Central Inner Mongolia, *Acta Petrol. Sin.*, Volume 34 (2018) no. 10, pp. 2857-2872 ((in Chinese, with English abstract))
- [Zhang, 2008] H. Zhang The Chronological Study on U-Pb Dating of Modern River Detrital Zircon in North Piedmont Qinling and its Geological Indication, Northwest University, 2008, pp. 1-98 ((in Chinese, with English abstract))
- [Zhu et al., 2007] R. K. Zhu; H. X. Xu; S. W. Deng; H. L. Guo Lithofacies palaeogeography of the Carboniferous in northern China, *J. Palaeogeogr.*, Volume 9 (2007) no. 1, pp. 13-24 ((in Chinese, with English abstract))
- [Zhu et al., 2011] X. Y. Zhu; F. K. Chen; S. Q. Li; Y. Z. Yang; H. Nie; W. Siebel; M. G. Zhai Crustal evolution of the North Qinling terrain of the Qinling Orogen, China: evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition, *Gondwana Res.*, Volume 20 (2011) no. 1, pp. 194-204