

随着时间的减小而逐渐增大，对应从地幔中分异出来的大陆地壳逐渐增加，并在 3.5Ga 和 2.0Ga 增幅较大；前者区别后者一个明显的特征就是在 2.0Ga 以后，Nb/U 比值逐渐降低，对应 2.0Ga 是地质历史大陆地壳数量最多的时代，之后陆壳数量逐渐减小。真实的情况是这样吗，为什么在 Nb/Th 比值中没有体现出来？

由于 U 元素很容易受到外界因素的影响，活动性较大，在大气圈和水圈充分氧化条件下 U 很容易在地幔中富集⁶。通过 S²⁴ 和 Os²⁵ 同位素的研究，在 ~2.3Ga 地球存在大氧化事件，那时冰河期结束，地球逐渐变暖，光合生物大量繁殖，最终形成含有大量氧气的大气，因此 2.0Ga 时期的 Nb/U 比值逐渐降低可能与大氧化事件有关。假设不存在氧化事件的影响，Nb/U 比值在 2.0Ga 以后将类似 Nb/Th 比值的趋势继续平缓延伸下去，那么现代的亏损地幔 Nb/U 比值可能为 68 而不是 47。

由于原始地幔和现代亏损地幔的 Nb/U 比值已知，那么知道 t 年代的 Nb/U 比值就能计算出 t 年代大陆地壳相对现代陆壳的百分比（假设地球形成初期为 0，现在为 1）。地幔分离出地壳更接近分离部分熔融，Nb 和 U 元素满足平衡方程：

$$\frac{dNb}{dU} = \frac{k_{Nb}}{k_U} \cdot \frac{Nb}{U} \quad (1)$$

其中 k_{Nb} 和 k_U 分别是 Nb 和 U 元素分离的速率，令 $\alpha = k_{Nb}/k_U$ ：

$$\frac{Nb/U}{(Nb/U)_i} = \left(\frac{U}{U_i} \right)^{\alpha-1} \quad (2)$$

假设 F 为 t 年代陆壳占现在陆壳的百分比， U_i 、 U_p 和 U 分别表示地壳形成时、现在和 t 年代亏损地幔中 U 的浓度：

$$F = \frac{U_i - U}{U_i - U_p} \quad (3)$$

$$\frac{U}{U_i} = 1 - F \left(1 - \frac{U_p}{U_i} \right) \quad (4)$$

将(4)式带入(2)式，由于 $1 - U_p/U_i < 1$ ， $F < 1$ ，在部分熔融程度不是很大时， $F \cdot (1 - U_p/U_i) \ll 1$

$$\ln \frac{Nb/U}{(Nb/U)_i} = F \cdot (1 - \alpha) \cdot \left(1 - \frac{U_p}{U_i} \right) \quad (5)$$

当 Nb/U=47 时，F=1，带入(5)式，并且 $(Nb/U)_i=30$ ：

$$F = \frac{\ln \frac{Nb}{U} - \ln 30}{\ln 47 - \ln 30} \quad (6)$$

同样可以推导 Nb/Th 的生长公式为：

$$F = \frac{\ln \frac{Nb}{Th} - \ln 8.75}{\ln 18.5 - \ln 8.75} \quad (7)$$

将 Nb/U 和 Nb/Th 比值带入(6)式和(7)式，计算得到的数据在 F(%) - t(Ga) 图中表示（图 4.b）。如果正如前面的分析 2.0Ga 以后

图 4 (a) 亏损地幔来源的岩石 Nb/U 和 Nb/Th 比值随时间演化曲线图。其中绿色空心菱形为 Nb/U 比值数据，红色实心方块为 Nb/Th 比值数据，实线为实际的趋势线，绿色虚线为推断的趋势线，交纵轴于 Nb/U=68。地球初期原始地幔 Nb/U=30⁴，Nb/Th=8.75⁶；现在亏损地幔 Nb/U=47⁴，Nb/Th=18.5⁶；(b) 大陆地壳生长曲线。绿色实线为 Nb/U 比值得出的生长曲线，红色实线为 Nb/Th 比值得出的生长曲线，蓝色实线为 Collerson and Kamber 给出的生长曲线⁶，绿色虚线为 Nb/U 比值按照现在亏损地幔 Nb/U=68 计算的生长曲线（过滤大氧化事件后的曲线）。

3 陆壳生长研究中 Th-U-Nb 体系的运用

为了研究大陆地壳演化的模式，我们统计了 3.8Ga~1.9Ga 科马提岩和能够准确代表地幔特征的玄武岩，对于较年轻的地幔岩，主要引用他人的结果⁶。

本研究统计了 14 个地区 24 块样品数百个数据值，我们过滤数据的原则主要有一下四点：

- (1) 为了减小测定带来的误差，Nb/U 比值小于 30 的排除⁵；
- (2) 对于一些严重脱离数据主要分布范围 Nb/U 比值比较大的数据排除；
- (3) 适当情况下依据地球化学数据进行过滤。
- (4) 作 La/Nb-Nb/U 图解，观察是否存在地壳混染的趋势（La/Nb 随 Nb/U 减小而曲线趋势增加），如果存在，选取可靠的最大值或者相近较大值的平均值；如果不存在混染的趋势（可以做 Nb/Th-Nb/U 图解帮助鉴别），排除 La/Nb>1.4 的数据⁷，取平均值。

统计计算后的结果以及他人统计（0~750Ma）的数据列在表 1 中，并将数据在 Nb/U (Nb/Th) - t 图解表示，然后用平滑曲线连接各点（图 4.a）。由于统计的 2.95Ga 和 2.7Ga 数据比较多，更能够代表当时全球的特征，对 2.8~2.9Ga 出现的突变（尤其 Nb/Th）给予淡化处理。

对比 Nb/U 和 Nb/Th 比值随时间变化的趋势（图 4.a），后者

Nb/U 比值受大氧化事件影响降低, 现代的亏损地幔 Nb/U 比值可能为 68, 那么 Nb/U 比值的生长曲线应该为图 4.b 中的绿色虚线, 除了 3.5Ga 时比 Nb/Th 比值生长曲线 F 值大, 其余的年代基本一致, 这也验证之前的推测可能正确。利用 8 个地球物理数据、12 个 transport-forward modeling 数据和 10 个 Nb/Th 比值数据建立的生长曲线如图 4.b 中的蓝色实线⁶, 与本研究 Nb/Th 比值建立的生长曲线基本一致。主要区别是后者在 3.5Ga 和 2.0Ga 处更加突出, 代表大陆地壳在这两时期大量形成, 指示幕式生长的模式。

利用锆石 U-Pb、Hf 和 O 同位素研究冈瓦纳大陆²⁶和加拿大 Slave 克拉通²⁷, 前者得到~3.3Ga 和~1.9Ga 两个陆壳快速生长时期, 后者显示在 4.5Ga~2.8Ga 期间, ~3.8Ga 和~3.4Ga 是地壳重要生长期。并且随着 Columbia 超大陆研究的深入, 越来越多的古元古代地体被不断报道 (North Australia, North India, East Africa, Arabia-Nubia Shield, North China Craton 和 Yangtze Craton 等)^{28, 29}。所以本次利用 Nb/Th 比值研究获得的地壳生长曲线具有广泛的地质意义, 在~3.5 Ga 和~2.0 Ga 存在快速增长大陆地壳的情况, 陆壳整体呈现幕式增生的特点。

4 展望

关于大陆地壳生长的讨论还会持续下去, 利用亏损地幔的 Th-U-Nb 系统可以研究大陆地壳生长的情况, 初步建立幕式增长的模型。为了更好的理解地壳增生, 更多的地幔岩数据需要获得, 尤其 3.5Ga 以前的数据, 可以弥补由于缺少早太古代克拉通而无法研究的空缺。同时从文中表 1 中可以看出同时期不同地区地幔岩的 Nb/U 和 Nb/Th 比值也存在较大差别, 可以利用其来研究地幔的不均一性。

References

- Hurley, P. M. and Rand, J. R. Pre-drift continental nuclei. *Science* **164**, 1229-1242 (1969).
- Armstrong R. L. A model for the evolution of strontium and lead isotopes in a dynamic Earth. *Rev. Geophys.* **6**, 175-199 (1968).
- Veizer, J. and Jansen, S. L. Basement and sedimentary recycling and continental evolution. *J. Geol.* **87**, 341-370 (1979).
- Hofmann, A. W., Jochum, K. P., Seufert, M. Nb and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.* **79**, 33-45(1986).
- Campbell, I. H. Constraints on continental growth models from Nb/U ratios in the 3.5 Ga Barberton and other Archean Basalt-Komatiite suites. *Am. J. Sci.* **303**, 319-351 (2003).
- Collerson, K. D. and Kamber, B. S. Evolution of the Continents and the Atmosphere Inferred from Th-U-Nb Systematics of the Depleted Mantle. *Science* **283**, 1519-1522 (1999).
- Condie, K. C. Incompatible element ratios in oceanic basalts and komatiites: Tracking deep mantle sources and continental growth rates with time. *Geochem. Geophys. Geosys.* **4**(1), 1005 (2003). doi:10.1029/2002GC000333
- White, W. M. Lecture 22 Isotopic Geochemistry of Subduction Zone magmas. In: *Isotopic Geochemistry*. pp. 149-155 (2000).
- Kerrich, R., Wyman, D., Hollings, P. and Polat, A. Variability of Nb/U and Th/La in 3.0 to 2.7 Ga Superior Province ocean plateau basalts: implications for the timing of continental growth and lithosphere recycling. *Earth Planet. Sci. Lett.* **168**, 101-115 (1999).
- Mahoney, J. J., Storey, M., Duncan, R. A., Spencer, K. J. and Pringle, M. Geochemistry and Age of the Ontong Java Plateau. *Geophysical Monograph* **77**, 233-261 (1993).
- Shirey, S. B. & Richardson, S. H. Start of the Wilson Cycle at 3 Ga Shown by Diamonds from Subcontinental Mantle. *Science* **333**, 434-436 (2011).
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M. The Geochemical Evolution of the Continental Crust. *Rev. Geophys.* **33**, 241-265 (1995).
- Polat, A., Hofmann, A. W. and Rosing, M. T. Boninite-like volcanic rocks in the 3.7–3.8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland: geochemical evidence for intra-oceanic subduction zone processes in the early Earth. *Chem. Geol.*, **184**, 231-254 (2002).
- Parman, S. W., Shimizu, N., Grove, T. L. and Dann, J. C. Constraints on the pre-metamorphic trace element composition of Barberton komatiites from ion probe analyses of preserved clinopyroxene. *Contrib. Mineral. Petrol.* **144**, 383-396 (2003).
- Hollings, P., Wyman, D. and Kerrich, R. Komatiite–basalt–rhyolite volcanic associations in Northern Superior Province greenstone belts: significance of plume-arc interaction in the generation of the proto continental Superior Province. *Lithos* **46**, 137-161 (1999).
- Tomlinson, K. Y., Hughes, D. J., Thurston, P. C. and Hall, R. P. Plume magmatism and crustal growth at 2.9 to 3.0 Ga in the Steep Rock and Lumby Lake area, Western Superior Province. *Lithos* **46**, 103-136 (1999).
- Puchtel, I. S. et al. Combined mantle plume-island arc model for the formation of the 2.9 Ga Sumozero-Kenozero greenstone belt, SE Baltic Shield: Isotope and trace element constraints. *Geochim. Cosmochim. Acta* **63**(21), 3579-3595 (1999).
- Puchtel, I. S. et al. Oceanic plateau model for continental crustal growth in the Archaean: A case study from the Kostomuksha greenstone belt, NW Baltic Shield. *Earth Planet. Sci. Lett.* **155**, 57-74 (1998).
- Fan, J. and Kerrich, R. Geochemical characteristics of aluminum depleted and undepleted komatiites and HREE-enriched low-Ti tholeiites, western Abitibi greenstone belt: A heterogeneous mantle plume-convergent margin environment. *Geochim. Cosmochim. Acta* **61**(22), 4723-4744 (1997).
- Dostal, J. and Mueller, W. U. Komatiite Flooding of a Rifted Archean Rhyolitic Arc Complex: Geochemical Signature and Tectonic Significance of the Stoughton-Roquemaure Group, Abitibi Greenstone Belt, Canada. *J. Geol.* **105**, 545-563 (1997).
- Kerrich, R. and Xie, Q. Compositional recycling structure of an Archean super-plume: Nb-Th-U-LREE systematic of Archean Komatiites and basalts revisited. *Contrib. Mineral. Petrol.* **142**, 476-484 (2002).
- Puchtel, I. S. et al. Petrology of mafic lavas within the Onega plateau, central Karelia: evidence for 2.0 Ga plume-related continental crustal growth in the Baltic Shield. *Contrib. Mineral. Petrol.* **130**, 134-153 (1998).
- Stern, R. A., Syme, E. C. and Lucas, S. B. Geochemistry of 1.9 Ga MORB- and OIB-like basalts from the Amisk collage, Flin Flon Belt, Canada: Evidence for an intra-oceanic origin. *Geochim. Cosmochim. Acta* **59**(15), 3131-3154 (1995).
- Farquhar, J., Bao, H. and Thiemens, M. Atmospheric Influence of Earth's Earliest Sulfur Cycle. *Science* **289**, 756-758 (2000).
- Yasuhito, S. et al. Osmium evidence for synchronicity between a rise in atmospheric oxygen and Palaeoproterozoic deglaciation. *Nat. Comm.* **2**, 502 (2011). doi: 10.1038/ncomms1507
- Kemp, A. I. S., Hawkesworth, C. J., Paterson, B. A. and Kinny, P. D. Episodic growth of the Gondwana supercontinent from hafnium and oxygen isotopes in zircon. *Nature* **439**, 580-583 (2006).
- Pietranik, A. B. et al. Episodic, mafic crust formation from 4.5 to 2.8 Ga: New evidence from detrital zircons, Slave craton, Canada. *Geology* **36**(11), 875-878 (2008).
- Zhao, G., Cawood, P. A., Wilde, S. A. and Sun, M. Review of global 2.1–1.8 Ga orogens: implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth Sci. Rev.* **59** 125–162 (2002).
- Zhao, G., Sun, M., Wilde, S. A. and Li, S. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup. *Earth Sci. Rev.* **67**, 97-123 (2004).

COPYRIGHT © 2012 Bin Su. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 3.0, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

CITATION Su, B. The evolution model of continental crustal growth: evidence from Th-U-Nb systematics of the depleted mantle. *Coll. Nat. Sci.* **3**(4), 101-105 (2012).

PERMALINK <http://collegenatsci.org/v3n4/p101>