

从岩石 Sm-Nd 同位素模式年龄论 北秦岭地壳增生和地壳深部性质

Crustal Growth and Lower Crust Nature of North Qinling: Study of Sm-Nd Isotopic Model Ages

张宏飞 赵志丹 骆庭川 张本仁

Zhang Hongfei, Zao zhidan, Luo Tingchuan and Zhang Benren

(中国地质大学地球化学研究所 武汉 430074)

(*Institute of Geochemistry, China University of Geosciences, Wuhan, 430074*)

摘要 北秦岭各岩类 116 个样品 Sm-Nd 同位素模式年龄(t_{DM})变化于 0.9~2.4Ga 之间,反映北秦岭地壳主要形成于元古代,0.9Ga 之后没有明显大规模新生地壳的形成。在 Nd 模式年龄分布图上出现 2.05Ga、1.40Ga 和 1.05Ga 三个明显的峰值,它们相应地代表北秦岭地壳的三个增生期。与华北克拉通南缘地壳存在 2.65Ga、2.10Ga 和 1.40Ga 三个增生期相对比,表明从华北克拉通南缘到北秦岭,地壳侧向增生是逐渐发展的,这是一个统一典型陆块的地壳增长过程,而北秦岭原来应属于华北的一部分。另外,从北秦岭花岗岩揭示的北秦岭地壳深部性质看,北秦岭地壳深部在 1.0Ga~1.2Ga 左右的板底垫托作用是相当明显的,而在晚古生代后可能又受到区域折离层作用的影响。

Abstract The Nd isotopic model ages (t_{DM}) are used to estimate crust-formation ages and thereby to investigate crustal growth. 116 samples of rocks from the North Qinling yield t_{DM} model ages from 0.9Ga to 2.4Ga indicating that the crust-formation period of the North Qinling is mainly at the Proterozoic with no volume of new crustal formation after 0.9 Ga, and there are three distinct peaks, namely, 2.05Ga, 1.40Ga and 1.05Ga in histogram of t_{DM} model ages, which correspond to three crustal growth episodes of the North Qinling. Samples of rocks from southern margin of the North China Craton also yield three distinct peaks (or three crustal growth episodes) in histogram of t_{DM} model ages, but they are 2.65Ga, 2.10Ga and 1.40Ga. These reflect the lateral crustal growth process from the southern margin of the North China Craton to the North Qinling. This is a typical crustal growth process of a united continental block. So, the North Qinling continental block would belong to a part of the North China continental block. According to the nature of

* 本文 1994 年 7 月 9 日收到, 1994 年 7 月 25 日改回。

本文为国家自然科学基金资助项目(49290102 号)成果之一。

第一作者简介: 张宏飞 男 1963 年出生 博士 地球化学专业

the deep crust revealed by by granitoid in the deep crust of the North Qinling there existed underplating about 0.9Ga~1.2Ga.

主题词 Nd 模式年龄 地壳增生 地壳组成 板底垫托 秦岭

Key words: Nd model age; Crustal growth; Crustal composition; Underplating; Qinling Mountains

分类号: P597; P548

Classific. code: P597; P548

1 引言

秦岭造山带在我国大陆壳的形成和发展中占据着重要的地位,是探索大陆造山带地质演化规律的重要地区之一,而北秦岭区又是研究秦岭造山带形成和演化的关键地区。因此,深入研究北秦岭地区的地壳增长和地壳演化,这对深化秦岭构造演化的认识具有重大意义。80年代末到90年代初,秦岭地区同位素地质研究有很大发展,特别是在北秦岭地区已积累了较为丰富的 Sm-Nd 同位素地球化学资料。本文试图根据 Sm-Nd 同位素地球化学的理论和方法来探索北秦岭地壳增长及其地壳深部性质。

2 样品及资料来源

本文共收集北秦岭地区各种岩类 Sm-Nd 同位素样品 116 件,其中北秦岭 30 件样品由本课题研究中测定,其余样品均为引用前人资料(李曙光 1991; 1993; 黄萱 1990; 张宗清 1994; Reishmann 1990),具体样品和资料引用情况详见表 1。由表 1 可见,样品几乎涉及到北秦岭地表的主要组成单元,地层主要包括秦岭群(形成时代约 2000Ma 左右,但其中可能存在中晚元古代的岩块,张宗清 1994)、宽坪群(1000Ma,同前)、二郎坪群(708~822Ma,同前)、斜峪关群(847Ma,同前)和松树沟岩片(983Ma,李曙光等 1991)等,而对侵入岩类几乎包括了东径 107°~115.5°内北秦岭各个时代的大小岩体,根据我们和严阵(1985)所做的工作,除了黄柏峪和蔡凹两小岩体的形成时代为晚元古代和二郎坪岩体的形成时代为燕山期外,其余岩体主要形成于古生代期间。以上可见,样品的代表性和综合性较好。

3 Nd 同位素模式年龄

自从 DePaolo et al. (1976) 和 McCulloch et al. (1978) 提出 Sm-Nd 同位素模式年龄概念以来,岩石 Sm-Nd 同位素模式年龄(简称 Nd 模式年龄)已被广泛用于估计壳-幔分异的时间或大陆壳从地幔储库中的分离时间(Nelson et al. 1985; DePaolo 1988; 1991; 李献华等 1991; 沈渭州等 1989)。对火山岩类和侵入岩类来说, Nd 模式年龄主要反映的是火山岩岩浆的源区物质或侵入岩岩浆的源区物质从地幔储库中分离的时间,对于碎屑沉积岩类来说, Nd 模式年龄反映的是沉积物源区从地幔储库中分离的平均年龄,而对于变质岩类,由于中低级变质作用过程一般不易造成岩石中 Sm/Nd 比值发生变化,因而中低级变质岩类的 Nd 模式

表1 北秦岭各岩类 Sm-Nd 同位素模式年龄

Table 1 Sm-Nd model ages of rocks from North Qinling

序号	样品产状	岩石类型	Sm/Nd	t_{DM} (Ga)	资料来源	序号	样品产状	岩石类型	Sm/Nd	t_{DM} (Ga)	资料来源
1	(1)	黑云斜长片麻岩	0.21	2.07	①	59	(3)	石英角斑岩	0.21	1.12	①
2	(1)	透辉石岩	0.21	1.99	①	60	(3)	石英角斑岩	0.17	1.34	①
3	(1)	透辉石岩	0.21	1.92	①	61	(3)	石英角斑岩	0.18	1.37	①
4	(1)	黑云斜长片麻岩	0.19	1.96	①	62	(3)	细碧岩	0.26	1.09	①
5	(1)	黑云斜长片麻岩	0.19	2.02	①	63	(3)	细碧岩	0.24	1.04	①
6	(1)	黑云斜长片麻岩	0.19	1.99	①	64	(3)	石英角斑岩	0.17	1.29	①
7	(1)	黑云斜长片麻岩	0.19	2.03	①	65	(4)	变质火山岩	0.25	1.56	①
8	(1)	黑云斜长片麻岩	0.20	1.98	①	66	(4)	变质火山岩	0.23	1.50	①
9	(1)	黑云斜长片麻岩	0.16	1.79	①	67	(4)	变质火山岩	0.23	1.41	①
10	(1)	黑云斜长片麻岩	0.19	1.98	①	68	(4)	变质火山岩	0.23	1.46	①
11	(1)	黑云斜长片麻岩	0.19	1.94	①	69	(4)	变质火山岩	0.22	1.43	①
12	(1)	黑云斜长片麻岩	0.18	1.98	①	70	(5)	辉长岩	0.21	1.06	③
13	(1)	黑云斜长片麻岩	0.17	1.72	①	71	(5)	辉长岩	0.21	0.99	③
14	(1)	黑云斜长片麻岩	0.20	2.02	①	72	(5)	辉长岩	0.22	1.06	③
15	(1)	黑云斜长片麻岩	0.20	2.02	①	73	(5)	辉长岩	0.22	1.18	③
16	(1)	黑云斜长片麻岩	0.20	2.00	①	74	(5)	辉长岩	0.19	1.01	③
17	(1)	黑云斜长片麻岩	0.20	2.09	①	75	(5)	二长斑岩	0.18	1.05	③
18	(1)	黑云斜长片麻岩	0.20	1.98	①	76	(5)	闪长玢岩	0.18	1.09	③
19	(1)	黑云斜长片麻岩	0.19	2.02	②	77	(6)	榴闪岩	0.24	1.09	③*
20	(1)	斜长角闪岩	0.25	1.39	①	78	(6)	榴闪岩	0.25	1.11	③*
21	(1)	斜长角闪岩	0.25	1.38	①	79	(6)	榴闪岩	0.25	1.16	③*
22	(1)	斜长角闪岩	0.20	1.85	①	80	(7)	二长花岗岩	0.19	2.40	②
23	(1)	斜长角闪岩	0.24	1.34	①	81	(8)	黑云母花岗岩	0.21	2.03	本课题
24	(1)	斜长角闪岩	0.24	1.82	①	82	(9)	二云母花岗岩	0.19	1.92	本课题
25	(1)	斜长角闪岩	0.23	1.98	①	83	(9)	二云母花岗岩	0.18	1.91	本课题
26	(1)	斜长角闪岩	0.25	1.36	①	84	(9)	二云母花岗岩	0.18	1.81	本课题
27	(1)	斜长角闪岩	0.22	1.27	①	85	(10)	花岗闪长岩	0.18	1.10	②
28	(1)	斜长角闪岩	0.16	1.09	①	86	(11)	花岗闪长岩	0.15	1.13	本课题
29	(1)	斜长角闪岩	0.24	1.67	①	87	(11)	花岗闪长岩	0.16	1.15	本课题
30	(1)	斜长角闪岩	0.20	1.18	②	88	(11)	花岗闪长岩	0.15	1.02	本课题
31	(1)	斜长角闪岩	0.25	1.87	本课题	89	(11)	含榴花岗岩	0.23	2.03	本课题
32	(2)	绿片岩	0.21	1.13	①	90	(11)	含榴花岗岩	0.23	2.11	本课题
33	(2)	绿片岩	0.23	1.27	①	91	(12)	黑云母花岗岩	0.15	1.28	本课题
34	(2)	绿片岩	0.21	1.09	①	92	(12)	黑云母花岗岩	0.15	1.04	本课题
35	(2)	斜长角闪岩	0.20	1.42	①	93	(12)	含榴花岗岩	0.21	1.74	本课题
36	(2)	斜长角闪岩	0.20	1.41	①	94	(13)	黑云母花岗岩	0.16	1.27	本课题
37	(2)	斜长角闪岩	0.21	1.43	①	95	(14)	黑云母花岗岩	0.19	1.50	本课题
38	(2)	斜长角闪岩	0.20	1.44	①	96	(14)	黑云母花岗岩	0.18	1.51	本课题
39	(2)	斜长角闪岩	0.20	1.42	①	97	(14)	黑云母花岗岩	0.19	1.51	本课题
40	(2)	斜长角闪岩	0.20	1.45	①	98	(14)	黑云母花岗岩	0.18	0.93	②
41	(2)	斜长角闪岩	0.20	1.42	①	99	(14)	黑云母花岗岩	0.20	1.21	本课题
42	(2)	云黑石英片岩	0.20	2.02	①	100	(14)	黑云母花岗岩	0.20	1.62	本课题
43	(2)	云黑石英片岩	0.19	2.05	①	101	(15)	伟晶花岗岩	0.19	1.78	本课题
44	(2)	云黑石英片岩	0.20	2.11	①	102	(16)	二长花岗岩	0.18	1.64	本课题

续表 1

序号	样品产状	岩石类型	Sm/Nd	T_{DM} (Ga)	资料来源	序号	样品产状	岩石类型	Sm/Nd	T_{DM} (Ga)	资料来源
45	(2)	云黑石英片岩	0.19	1.85	①	103	(17)	斜长花岗岩	0.16	1.88	本课题
46	(2)	云黑石英片岩	0.21	2.14	①	104	(18)	黑云母花岗岩	0.14	1.62	本课题
47	(2)	云黑石英片岩	0.20	2.03	①	105	(3)	黑云母花岗岩	0.20	1.45	本课题
48	(2)	云黑石英片岩	0.20	2.14	①	106	(20)	黑云母花岗岩	0.19	1.20	本课题
49	(2)	云黑石英片岩	0.20	2.01	①	107	(20)	黑云母花岗岩	0.13	1.11	本课题
50	(3)	细碧岩	0.26	1.33	①	108	(20)	黑云母花岗岩	0.21	1.25	本课题
51	(3)	细碧岩	0.26	1.34	①	109	(21)	斜长花岗岩	0.16	1.08	本课题
52	(3)	细碧岩	0.26	1.32	①	110	(21)	斜长花岗岩	0.17	1.09	本课题
53	(3)	细碧岩	0.26	1.36	①	111	(21)	斜长花岗岩	0.16	0.93	②
54	(3)	细碧岩	0.26	1.32	①	112	(22)	斜长花岗岩	0.15	1.06	②
55	(3)	细碧岩	0.26	1.36	①	113	(22)	斜长花岗岩	0.14	1.02	本课题
56	(3)	细碧岩	0.25	1.28	①	114	(22)	斜长花岗岩	0.19	1.10	④
57	(3)	细碧岩	0.26	1.43	①	115	(22)	斜长花岗岩	0.21	1.20	④
58	(3)	细碧岩	0.26	1.39	①	116	(23)	二长花岗岩	0.16	1.57	②*

注: A. 表中样品产状 (1)、(2)、(3)、(4)、(5)、(6)、(7)、(8)、(9)、(10)、(11)、(12)、(13)、(14)、(15)、(16)、(17)、(18)、(19)、(20)、(21)、(22)、(23) 分别为秦岭群、宽坪群、二郎坪群、斜峪关群、垃圾庙岩体、松树沟片岩、宝鸡岩体、太白岩体、漂池岩体、蔡凹岩体、黄柏峪岩体、石门岩体、许庄岩体、枣园岩体、秋树坪岩体、史家坪岩体、资峪岩体、蛇尾岩体、二郎坪岩体、宽坪岩体、灰池子岩体、翠华山岩体、蟒岭岩体;

B. 资料来源中①、②、②*、③、③*、④分别为张宗清 (1994)、黄董等 (1990); 黄董等 (1991)、李曙光等 (1993)、李曙光等 (1991)、Reischmann et al. (1991)。

年龄特征基本上反映了原岩的 Nd 模式年龄特征。由此看来, 地壳中各类岩石的 Nd 模式年龄主要代表了岩石物质从地幔储库中开始分离出来的时间或岩石物质在大陆壳中存留的时间, 而不管其以后经历什么变化 (DePaolo 1988)。因此, Nd 模式年龄可用来研究地壳的增长和地壳演化。Nd 模式年龄的计算主要依据两方面的假设: 其一是地幔源区库的 Sm-Nd 同位素组成及演化途径。相对于不同的地幔源区库计算出的 Nd 模式年龄是不一样的, 早期一些学者采用相对于未亏损地幔的 Nd 同位素模式年龄 (t_{CHUR}) 来估计地壳的形成年龄, 目前绝大多数学者认为相对于亏损地幔的 Nd 模式年龄 (t_{DM}) 更加合理, 并且地幔 Nd 同位素演化成为一种线性模式 (Nelson et al. 1985; DePaolo et al. 1991), 取现代地幔的 $\epsilon_{Nd} = +10$ 。其二是地壳组分的 Sm-Nd 同位素体系自从地幔源区库分离出来后保持近似的封闭, 即地壳岩石的形成是源区 Sm/Nd 比值发生变化的主要因素。但现有的资料表明, 在大陆壳的演化过程中, 由于壳内分异作用 (如岩浆作用等)、高级变质作用及新地幔物质的混入等都将不同程度地引起岩石中 Sm/Nd 的分馏。因此判别地壳岩石是否保持近似的 Sm/Nd 封闭体系, 很大程度上取决于对大陆地壳平均的 Sm/Nd 比值的估计。现有资料表明, 地壳岩石的 Sm/Nd 比值主要变化于 0.10~0.26 之间 (Taylor and McLennan 1985)。因此本文仅对选择符合上述 Sm/Nd 比值范围的样品参加模式年龄的计算, 以确保所得信息的可靠性。Nd 同位素模式年龄的计算公式 (DePaolo 1988) 如下:

$$t_{DM} = \frac{1}{\lambda} \ln \left[1 + \frac{(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{DM}}{(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{DM}} \right] \quad (1)$$

式中: $\lambda = 0.654 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s$ 和 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s$ 分别为样品现今的同位素比值; $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}$ 和 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}$ 分别为亏损地幔现今的同位素比值, 其中 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.21357$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.51315$ (Miller 1985)。

对地壳中花岗岩类岩石, 考虑到在其源岩的部分熔融过程中, Sm/Nd 比值有可能发生改变, 因此前人曾提出用 Sm-Nd 同位素演化的两阶段方法计算 Nd 同位素模式年龄 (DePaolo et al. 1991; 朱炳泉等 1990), 按这两阶段计算的模式年龄一般比(1)式计算的模式年龄偏老, 但这种方法的缺陷是难以对样品源岩的 Sm/Nd 比值作出正确估计, 因而存在的误差较大, 另外也不能很好地解释样品的初始 ϵ_{Nd} 值。因此, 本文未作考虑。

从广义上说, 岩石 Nd 同位素模式年龄反映的是地壳各个部分的“加权平均”地壳存留年龄, 因此, 并非每一个模式年龄值都代表一次真实的地幔分异时代或地壳增生时代, 然而对一个地区模式年龄的统计峰值则难以用各个时代地壳组分的随机混合来解释, 而有可能代表真实的地壳增生时代 (李献华等 1991)。

4 北秦岭地壳形成时代

按上述方法对北秦岭地区各种岩石样品计算的 Nd 同位素模式年龄统计作于图 1, 由图 1 可见, 具有以下特征和认识:

(1) 从模式年龄与样品岩性的关系看, 北秦岭碎屑岩类的 Nd 同位素模式年龄的范围为 1.70~2.2Ga, 并主要集中于 2Ga 左右; 北秦岭各个时代的变基性岩类的 Nd 同位素模式年龄变化范围在 0.9~2Ga 之间, 但主要集中于 1.05Ga 和 1.45Ga 两个时期; 北秦岭各个时代花岗岩类的 Nd 同位素模式年龄变化在 0.9~2.4Ga 之间, 但主要集中于 1.05Ga 和 1.65Ga 两个时期。需要指出的是花岗岩类的峰值(1.05Ga)与变基性岩类的峰值(1.05Ga)重叠。

(2) 由于所有统计样品的 Nd 同位素模式年龄分布于 0.9~2.4Ga 之间, 反映出北秦岭地壳的主要形成期为元古代, 而 0.9Ga 以后没有明显大规模新生地壳的形成, 0.9Ga 以后发生的地质事件以壳内物质的再旋回为主, 但并不排除其中有少量新生地壳的形成。如果把北秦岭各岩类 Nd 同位素模式年龄作为北秦岭地壳平均存留年龄的话, 计算得到的 t_{DM} 平均值为 1.53Ga, 这与仅根据花岗岩类计算的 t_{DM} 平均值相近, 为 1.45Ga。

(3) 综合北秦岭各岩类 Nd 同位素模式年龄的分布, 在 2.05Ga、1.40Ga 和 1.05Ga 出现

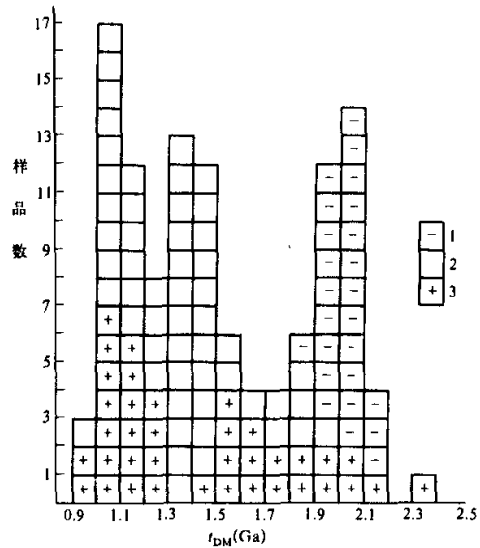


图 1 北秦岭各岩类 Nd 同位素模式年龄分布直方图

1. 碎屑岩类, 2. 变基性岩类, 3. 花岗岩类

Fig. 1 Histogram of Nd model ages of rocks from North Qinling

明显的峰值, 由于这种 Nd 同位素模式年龄分布峰值的出现一般难以用各个时代的地壳组分的随机混合来解释, 而有可能代表真实的地壳形成时代或地壳增生时代(李献华 1991)。因此, 2.05Ga、1.40Ga 和 1.05Ga 可能反映北秦岭地壳三次的主要增生时代。Arndt et al. (1987) 研究指出, 如果 Nd 同位素模式年龄与锆石 U-Pb 年龄或某一造山事件的其它独立证据相一致, 那么该 Nd 同位素模式年龄可以用来确证地壳的形成年代或地壳增生年代。在北秦岭范围内已获得在秦岭群和宽坪群碎屑中有一批碎屑锆石的 U-Pb 年龄为 2226Ma~1806Ma(张宗清 1994), 反映沉积物源区母岩的锆石结晶年龄, 这与主要由秦岭群和宽坪群碎屑岩样品组成的 2.05Ga 的 Nd 同位素模式年龄峰值相近, Nd 模式年龄和碎屑锆石的 U-Pb 年龄相互制约证实了 2Ga 左右确是北秦岭的地壳增生期, 这一地壳增生期与秦岭群碎屑岩类的形成时代(2000Ma, 张宗清 1994) 非常接近, 可能反映秦岭群碎屑岩类是在源岩快速隆起的构造背景下形成的产物, 而中晚元古代的宽坪群碎屑岩的特征主要继承了秦岭群作为物源区的特征。从本区(包括华北克拉通南缘)早中元古代的构造特点看, 其构造性质属于裂谷的构造环境, 秦岭群岩石就形成于这种裂陷的构造环境(刘国惠等 1993)。因此, 本区 2Ga 左右的地壳增生主要反映本区地壳的裂陷增生, 强烈的裂陷活动, 使得大量的地幔物质进入地壳。然而, 北秦岭在 1.40Ga 和 1.05Ga 左右的两次可能的地壳增生期目前还未得到锆石 U-Pb 年龄的证实, 但从世界范围内看, 越来越多的资料显示 1.4Ga 左右也是全球性地壳增长的时期, 即代表格林维尔期的地壳增生(Nelson et al. 1985; Dickin 1992; Daly 1990), 在我国华南地区亦能识别出该时期的地壳增生事件(李献华等 1991), 虽然这一时期的地壳增生不如晚太古和早中元古那么明显, 但它代表了全球性的地壳增生事件。因此, 1.40Ga 很可能也反映了北秦岭地壳的另一次增生; 至于 1.05Ga 左右是否代表北秦岭又一次的地壳增生, 这一信息在本文显得尤为重要, 北秦岭花岗岩类和变基性岩类的 Nd 同位素模式年龄共同显示在 1.05Ga 左右有峰值的出现, 两者的吻合不是偶然的, 它们共同揭示了该时期的地壳增生。另外, 已知北秦岭松树沟岩片中的榴闪岩, 已获得其 Sm-Nd 等时年龄为 $983 \pm 140\text{Ma}$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +6.86 \pm 0.86$ (李曙光等 1991), 其 Nd 模式年龄为 1.09~1.17Ga, 这与榴闪岩的形成年龄非常接近, 反映该岩片是直接由亏损地幔中的分离, 说明该时期确是北秦岭一次重要的壳幔分异事件。因此, 1.05Ga 左右也是北秦岭又一次的地壳增生期。结合区域地质背景, 10 亿年左右(即相当于晋宁期)是本区一次重要的热事件(张宗清 1994), 这在地层、多种岩浆活动、构造、变质及变形等方面均有反映, 并开始具有现代体制的板块构造运动(李曙光 1991), 因此 1.05Ga 左右的这一地壳增生期很可能代表北秦岭晚元古代板块俯冲消减的造山事件。

(4) 北秦岭地壳增长以幕式方式进行。

5 北秦岭地壳增生与华北克拉通南缘地壳增生的关系

关于北秦岭地壳演化与华北克拉通南缘的地壳演化的关系历来受到许多地质学家的关注, 这一问题集中体现在对秦岭群变质地层的归属, 对此尚存在着不同意见。根据地质、地球物理和地球化学多方面的研究, 大多数地质学家认为北秦岭地壳的构造发展同华北克拉通南缘的构造发展更为密切(张本仁等 1991; 黄董等 1990; 张宗清 1994), 因而倾向于秦岭群

为原属于华北的一部分。为了更好地讨论北秦岭地壳构造发展与华北克拉通南缘地壳构造发展的内在联系及秦岭群的归属问题,笔者从两区地壳增生发展的角度加以研究,以提供新的佐证。

根据前人关于华北克拉通南缘各岩类样品的 Sm-Nd 同位素资料(李曙光等 1987; 黄萱等 1990; 张宗清 1994; 张宗清未发表资料),计算的 Nd 同位素模式年龄(t_{DM})作于图 2, 由图 2 可见, Nd 模式年龄分布于 1.2Ga~3.1Ga 之间,反映华北克拉通南缘的地壳主要形成于 1.2Ga 之前,并且最早的地壳形成时代可追溯到 3Ga 之前的中太古,同时在 Nd 同位素模式年龄的分布上出现三个明显的峰值,即 2.65Ga、2.1Ga 和 1.4Ga,反映出华北克拉通南缘地壳的增生有三个主要时期,其中 2.65Ga 可说明华北克拉通南缘地壳的基底时代主要为晚太古,这与目前该区已暴露基底的太华群和登封群的形成时代(2.5~2.8Ga)相近。

对比北秦岭地壳的主要增生期(图 1),可发现北秦岭地壳在 2.05Ga 和 1.40Ga 左右的两次增生期与华北克拉通南缘地壳在 2.15Ga 和 1.4Ga 的两次增生期非常一致,说明两区在地壳的增生演化上存在着同一性,即两区的地壳增生有相同的发展阶段,对这合理的解释是北秦岭和华北克拉通南缘原属同一陆块;另一方面,华北克拉通南缘地壳增生的最初阶段在晚太古(2.6Ga 左右),在 1.4Ga 左右地壳的增生基本结束,而北秦岭地壳增生最初阶段在早元古(2.05Ga 左右),并且在 1.05Ga 左右又出现一次明显的地壳增生,然而在华北克拉通南缘缺少这一时期的地壳增生,因此在空间展布上,显示出地壳由北到南的逐渐增生发展过程,这是典型的统一陆块的地壳增生发展过程,同北美等地地壳从陆核由内向外的增生特征相一致(Nelson et al. 1985; DePaolo et al. 1991)。以上研究表明,北秦岭地壳增生和华北克拉通南缘地壳增生具有统一的发展过程,两者是统一陆块背景下的产物,这就进一步证实了北秦岭地壳构造发展与华北克拉通南缘的联系,从而也佐证了秦岭群原属于华北一部分的认识。

6 北秦岭地壳深部性质

在大陆造山带中,造山带深部地壳的时代及其性质是关系到造山带形成和发展的重大问题,对北秦岭深部地壳的时代和性质也是近年来人们关心的问题,在北秦岭区,地表出露的最古老岩层为秦岭群,其时代下限不超过 2226Ma,而主要形成于大约 2000Ma 左右(张宗清

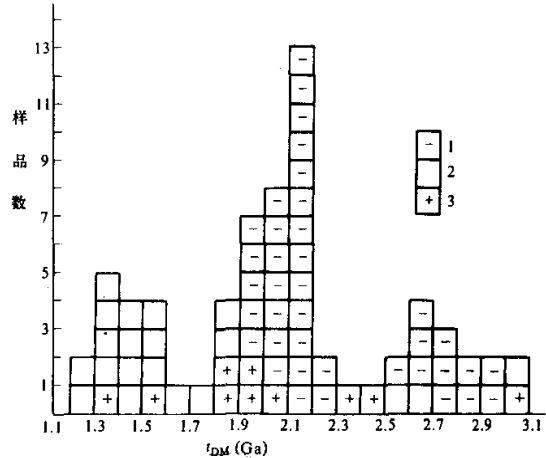


图 2 华北克拉通南缘各岩类 Nd 同位素模式年龄分布直方图

1. 碎屑岩类; 2. 变基性岩类; 3. 花岗岩类

Fig. 2 Histogram of Nd model ages of rocks from the south margin of the North China Craton

1994)。从秦岭群本身各岩类的 Nd 同位素模式年龄看, 其 t_{DM} 均小于 2.2Ga, 但这并不意味着北秦岭深部地壳组成即为秦岭群本身。在北秦岭地区, 广泛出露有晚元古代、古生代和中生代的侵入型花岗岩类, 其中以古生代花岗岩类为主。众所周知, 花岗岩类是探索地壳深部性质的有效途径, 常起到地壳深部的探针作用, 但由于花岗岩类形成深度的局限性 (花岗岩浆的源区主要在中、下地壳, 但很少达到下地壳底部), 因而它不一定能揭示全部地壳深部性质, 尽管如此, 花岗岩类的研究为我们提供有关地壳深部的某些信息还是可行的。

从图 1 可知, 北秦岭花岗岩类的 Nd 同位素模式年龄变化于 0.9~2.4Ga 之间, 明显大于这些花岗岩类的成岩时代, 其变化范围与北秦岭碎屑岩类和变基性岩类的模式年龄相一致, 反映北秦岭花岗岩类的岩浆源区主要来自于北秦岭地壳的再循环物质, 这在花岗岩类的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值特征上也得到较好地反映, 如侵入于秦岭群内的漂池岩体、太白岩体、宝鸡岩体、蟒岭岩体和石榴二长花岗岩脉等, 其 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值一般在 -7 以下, 明显属于壳源型花岗岩; 另一方面, 表明北秦岭地壳基底最老时代可能不超过 2.4Ga。由此看来, 北秦岭地壳基底的最早形成时代可能主要属于早元古代, 即为秦岭群本身的下部岩系。

然而, 从目前揭露的北秦岭变质杂岩的变质相看, 最古老的秦岭群主要属于角闪岩相, 局部达麻粒岩相, 变质作用发生在相当于中下地壳的位置 (刘国惠等 1993), 因此当时在秦岭群之下可能还应存在着一定厚度的地壳深部物质。秦岭群中出露的灰池子岩体和翠华山岩体为我们研究这一地壳深部物质的时代和性质提供了线索。

灰池子岩体 (382Ma, Rb-Sr, 严阵 1985) 和翠华山岩体 (345±10Ma, Rb-Sr, 本文) 两者均以岩基产出, 面积分别为 340km² 和 240km², 前者分布在秦岭群的东段, 岩体北部与围岩为侵入接触, 南部存在着混合过渡关系; 后者分布在秦岭群的中段, 岩体与围岩的接触关系较为复杂。两岩体的岩石类型均以黑云母斜长花岗岩为主, 岩石变晶交代结构较为发育。依据这些地质特征, 使得许多学者将上述两岩体的成因归属为原地或半原地改造型花岗岩 (尚瑞钧等 1988; 胡受奚 1989; 张正伟 1991), 笔者在野外地质研究的基础上, 通过深入的地球化学研究, 尤其是同位素示踪的研究, 认为两岩体均属岩浆侵入成因。因为在两岩体的岩浆形成源区上不能用原地或半原地的源区物质进行解释, 只不过在岩浆上侵固结过程中边部与围岩发生一定程度的混合交代作用, 从而呈现出与围岩的混合过渡现象, 这种情况在许多侵入型岩体地质特征中也是屡见不鲜的。灰池子岩体和翠华山岩体的岩石地球化学特征见表 2, 由表 2 可见, 灰池子岩体和翠华山岩体有着十分相似的岩石地球化学特征, 这些特征清楚地表明它们属于典型的 I 型花岗岩。

根据灰池子岩体和翠华山岩体的岩石地球化学特征和成因类型, 它们的源岩不可能为经风化沉积旋回的陆壳碎屑物质。秦岭群片麻岩类为一套副变质岩 (刘国惠等 1993), 况且片麻岩类的全岩 $\delta^{18}O=10.96\%$, t_{DM} 为 1.6~2.1Ga, 在相当于灰池子岩体和翠华山岩体形成时 $\epsilon_{Nd}(t)=-11.21$, $\epsilon_{Sr}(t)=+450$, 很显然秦岭群片麻岩没有构成与两岩体的成因联系。对于秦岭群中斜长角闪岩来说, 其一般在秦岭群黑云斜长片麻岩类中呈夹层产出, 地表规模不大, 但斜长角闪岩存在多种类型和多种时代, 真正属于秦岭群斜长角闪岩的年龄为 1987±49Ma (Sm-Nd, 张宗清 1994), 对比灰池子岩体和翠华山岩体岩石的 Nd 同位素模式年龄, 显然秦岭群斜长角闪岩也不能作为两岩体的母岩。从区域上看, 笔者已证明具 S 型花岗岩地球化学特征的漂池岩体 ($\epsilon_{Nd}(t)=-9.98$, $\epsilon_{Sr}(t)=+297$, $\delta^{18}O=10.33\%$, $t_{DM}=1.92Ga$) 岩浆源

区为秦岭群黑云斜长片麻岩类,而具 I 型花岗岩地球化学特征的太白岩体($\epsilon_{Nd}(t) = -8.64$, $\epsilon_{Sr}(t) = +13.12$, $t_{DM} = 2.03\text{Ga}$)的岩浆源区为秦岭群斜长角闪岩^①,而灰池子岩体和翠华山岩体在同位素组成特征上明显不同于上述两类岩体,这就进一步表明了灰池子岩体和翠华山岩体岩浆形成源区上,既不是秦岭群片麻岩类,也不是秦岭群斜长角闪岩类。这暗示着两岩体的岩浆源区比秦岭群更深,那么岩浆是不是直接来自于上地幔呢?笔者认为存在这种可能性是不大的。从目前关于花岗岩类的研究成果看,花岗岩类岩石主要起源于中、下地壳(Taylor et al. 1985),并不否认有少量花岗岩直接来自于地幔岩浆的分异,但这些幔源分异型花岗岩产出规模均很小,因此难以想象通过地幔岩浆的直接分异作用能形成如此巨大的灰池子花岗岩基和翠华山花岗岩基,况且区域上也未见有相近时代的幔源岩浆分异系列。以上分析可见,灰池子岩体和翠华山岩体的岩浆源区为秦岭群之下的北秦岭深部地壳基底。

表 2 灰池子岩体和翠华山岩体岩石地球化学特征

Table 2 Geochemical characteristics of the Huichizi and the Cuihuashan batholiths

岩 体	岩石类型	SiO ₂ (%)	K ₂ O/Na ₂ O	A/KNC	AFC 图解位置	ΣREE	$\frac{\Sigma\text{LREE}}{\Sigma\text{HREE}}$	(La/Yb) _N	δEu		
灰池子	斜长花岗岩	70.83	0.56	1.11	I型花岗岩区	108.2	30.64	50.3	0.95		
翠华山	斜长花岗岩	71.48	0.78	1.02	I型花岗岩区	88.6	22.19	32.4	0.85		
岩 体	岩石类型	Rb	Sr	Ba	Nb	Ta	Th	δ ¹⁸ O	ε _{Nd} (t)	ε _{Sr} (t)	t _{DM} (Ga)
灰池子	斜长花岗岩	86	259	1157	7.7	3.9	9.9	8.3	-0.84	-27.09	1.02
翠华山	斜长花岗岩	90	463	552	5.2	2.9	6.7	6.4	-1.34	+26.18	1.09

注:微量元素含量单位为 μg/g。

基于上述研究,根据灰池子岩体和翠华山岩体的同位素地球化学特征示踪北秦岭深部地壳的性质是清楚的。两岩体岩石的 Nd 同位素模式年龄值比较稳定(表 1),仅变化于 0.97~1.20Ga 之间(样品数为 7 件,其中灰池子岩体 3 件,翠华山岩体 4 件),平均为 1.08Ga,说明两岩体的岩浆源区为 1.08Ga 左右的北秦岭深部地壳物质,区域上,松树沟岩片中的榴闪岩、丹凤群中的垃圾庙基性辉长岩及秦岭群中所见到的少量斜长角闪岩的 Nd 同位素模式年龄均在 1.0~1.2Ga 之间,它们与灰池子岩体和翠华山岩体岩石具有相近的 Nd 同位素演化(图 3)这不是偶然的,而是它们可能代表了灰池子岩体和翠华山岩体的源岩性质,并共同指示了北秦岭在 1.0~1.2Ga 左右的地壳增生。从灰池子岩体和翠华山岩体示踪的北秦岭深部地壳的性质看,反映北秦岭地壳深部还应存在其形成时代在 1.0~1.2Ga 左右的岩浆源区,其组成为斜长角闪岩质,考虑到灰池子岩体和翠华山岩体两者均以巨大的岩基产出,因此这种岩浆源区物质应具有一定的规模。另一方面,由于这种深部地壳物质的时代明显新于上部秦岭群的形成时代,反映北秦岭在 1.0~1.2Ga 左右形成的岩浆源区物质在当时是通过板底垫托的方式而形成的,从而显示地壳垫托增生是相当明显的。根据灰池子岩体和翠华山岩体的形成时代,这种板底垫托物质在北秦岭至少存在至晚古生代。然而,QB-1 地球物理资料显示(袁学诚 1990),秦岭造山带现今不存在山根,在壳幔边界, V_P 呈阶梯状,梯度大于 1.0kms⁻¹,证

① 张宏飞. 1992. 中国地质大学(武汉)博士学位论文.

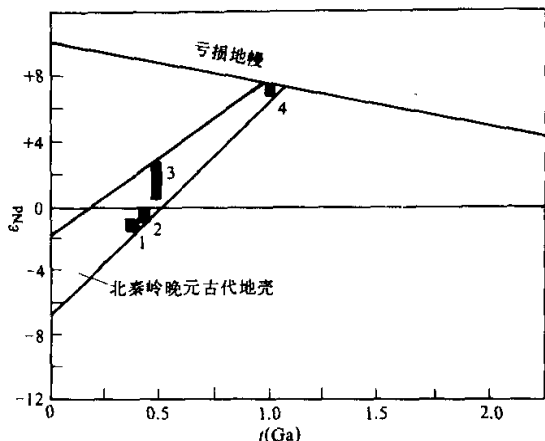


图 3 岩石初始 ϵ_{Nd} 值和时代
1. 灰池子岩体; 2. 翠华山岩体; 3. 垃圾庙苏长辉长岩;
4. 松树沟榴闪岩

Fig. 3 Initial ϵ_{Nd} and time for rocks

明现今的板底垫托物质数量是非常有限的。另外, 结合秦岭地区地壳总体成分具负 Eu 异常及具长英质的下地壳成分特点 (Gao Shan et al. 1992), 我们认为在秦岭晚古生以后的后造山阶段, 折离作用可能起着重要的影响, 这需要人们更深入的研究。

7 结 论

(1) 北秦岭地壳形成时代主要在元古代, 地壳最早的形成时代可能为早元古代, 即为秦岭群本身的下部岩系, 0.9Ga 以后没有明显大规模地壳的形成, 其后发生的地质作用以北秦岭地壳的再循环物质为主。

(2) 北秦岭地壳演化存在三个明显的地壳增生期, 这三个时期是: 2.05Ga、1.45Ga 和 1.05Ga, 地壳演化以幕式增长为特征, 与全球地壳增长基本一致。

(3) 根据北秦岭和华北克拉通南缘两区地壳增长特征的对比, 北秦岭地壳的构造发展与华北克拉通南缘地壳构造发展的关系较为密切, 两者是统一陆块发展的地壳增长的表现形式, 由此进一步证实了秦岭群原应属于华北的一部分。

(4) 根据北秦岭花岗岩类对北秦岭地壳深部组成物质的指示, 北秦岭在秦岭群之下存在着形成时代为 0.9Ga~1.2Ga 左右的地壳深部物质, 其组成可能为斜长角闪岩质, 由于这种地壳深部物质的时代明显新于北秦岭上部地壳的形成时代, 反映北秦岭该时期的地壳增长主要以垫托的方式进行, 晚古生代后, 这种垫托物质可能又被折离。

参 考 文 献

- 朱炳泉, 李献华. 1990. 多元同位素体系示踪理论、方法与应用新进展. 见: 涂光炽主编, 80年代地质地球化学进展. 科学技术出版社重庆分社, 197~206
- 刘国惠, 张寿广, 游振东, 索书田, 张国伟. 1993. 秦岭造山带主要变质岩群及其变质演化. 北京: 地质出版社, 29~30
- 李曙光, 陈移之, 张国伟, 张宗清. 1991. 一个距今 10 亿年侵位的阿尔卑斯型橄榄岩体: 北秦岭晚元古代板块构造体制的证据. 地质论评, 37 (3): 235~241
- 李曙光, 陈移之, 张宗清, 叶笑江, 张国伟. 1993. 北秦岭垃圾庙苏长辉长岩的微量元素和 Sr、Nd 同位素地球化学. 地质学报, 67 (4): 301~321
- 李曙光, Hart S R, 郭安林, 张国伟. 1987. 河南中部登封群全岩 Sm-Nd 同位素年龄及其构造意义. 科学通报, 226: 1728

~1731

- 李献华, 赵振华, 桂训唐, 于津生. 1991. 华南前寒武纪地壳形成时代的 Sm-Nd 和 U-Pb 同位素制约. 地球化学, (3): 255~263
- 沈渭州, 朱金初, 刘昌实, 徐示进. 1990. 从 Nd 模式年龄谈华南地壳的形成时间. 南京大学学报 (地球科学版), 3: 82~92
- 严阵. 1985. 陕西省花岗岩. 西安: 西安交通大学出版社, 16
- 张本仁, 骆庭川, 高山, 欧阳建平, 高长林. 1990. 秦巴地区岩石圈地球化学特征和演化及其地质意义. 见: 张本仁等著, 秦岭区域地球化学文集. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~26
- 张正伟. 1991. 东秦岭灰池子花岗岩基岩石地球化学特征及其成因. 岩石学报, (3): 88~94
- 张宗清. 1994. 北秦岭变质地层秦岭群、宽坪群、陶湾群同位素年代学. 北京: 地质出版社, 1~191
- 尚瑞钧, 严阵. 1988. 秦巴花岗岩. 武汉: 中国地质大学出版社, 108
- 胡受奚. 1989. 东秦岭加里东褶皱带原地-半原地改造型花岗岩特征. 岩石学报, (1): 49~58
- 袁学诚. 1990. 秦岭造山带的深部构造与构造演化. 见: 叶连俊, 钱祥麟, 张国伟主编, 秦岭造山带学术讨论会论文集, 西安: 西北大学出版社, 150~156
- 黄董, 吴利仁. 1990. 陕西地区岩浆岩 Nd、Sr 同位素特征及其与大地构造发展的联系. 岩石学报, (2): 1~11
- Arndt N T, Goldsten S L. 1987. Use and abuse of crust-formation ages. *Geology*, 15: 893~895
- Daly J S. 1990. Late Mid-Proterozoic crust growth in the North Atlantic region. The International Conference on Geochronology, Cosmochronology and Isotope Geology, Abstract, 23
- DePaolo D J, Wasserburg G J. 1976. Nd isotopic variations and petrogenetic models. *Geophys. Res. Lett.*, 3: 249~252
- DePaolo D J. 1988. Age dependence of the composition of continental crust: evidence from Nd isotopic variations in granitic rocks. *Earth Planetary Science Letter*, 90: 263~271
- DePaolo D J et al. 1991. The continental crustal age distribution: Methods of determining mantle separation age from Sm-Nd isotopic data and application to the Southwestern United States. *J. Geophys. Res.*, 96: 2071~2088
- Dickin A P H, Higgins M D. 1992. Sm/Nd evidence for a major 1.5 Ga crust-forming event in the central Grenville province. *Geology*, 20: 216~223
- Gao Shan, Zhang Benren, Luo Tingchuan et al. 1992. Chemical composition of the continental crust in the Qinling orogenic belt and its adjacent North China and Yangtze Cratons. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56: 3933~3950
- McCulloch M T, Wasserburg G J. 1978. Sm-Nd and Rb-Sr chronology of continental crust formation. *Science*, 200: 1003~1011
- Miller R G, O'Nions R K. 1985. Source of Precambrian chemical and clastic sediment, *Nature*, 314: 325~330
- Nelson B K, DePaolo D J. 1985. Rapid production of continental crust 1.7 to 1.9 by. ago: Nd isotopic evidence from the basement of the North American mid-continent. *Geo. Soc. Am. Bull.*, 96: 746~754
- Reishmann T, Altenberger U, Kroner A. 1990. Mechanism and time of deformation and metamorphism of mylonitic orthogneisses from the Shgou shear zone, Qinling belt, China. *Tectonophysics*, 185: 91~109
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust, its composition and evolution. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 312