

# 我国东北部幔源包体中稀有气体丰度和同位素组成

徐胜 刘丛强

(中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002. E-mail: xu@tono.jnc.go.jp)

**摘要** 报道了辽宁宽甸、吉林辉南和河北汉诺坝新生代玄武岩中幔源包体的稀有气体丰度和同位素组成. 与大洋中脊玄武岩(MORB)和其他地区相比, 我国东北部幔源包体具有较低的稀有气体丰度、类似或低于 MORB 的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值、低于 MORB 的  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值、类似大气的  $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  和 Ne-Kr-Xe 同位素组成等特征. 这些结果表明我国东北部岩石圈地幔的不均一性, 即存在类似于宽甸的亏损地幔和类似于辉南地区的富集地幔. 3 个地区低  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值可能暗示着岩石圈地幔中随板块消减而加入了大气稀有气体成分.

**关键词** 幔源包体 稀有气体丰度和同位素组成 富集地幔 中国东北部

近 30 年来稀有气体丰度和同位素组成的研究为探讨大洋地幔演化的研究提供了极为独特和重要的信息<sup>[1-3]</sup>, 因而人们认为稀有气体同样能为大陆地幔与大洋地幔的比较和探讨大陆地幔的演化等研究扮演类似的角色. 然而, 迄今为止, 大陆地幔物质中稀有气体的研究还为数不多<sup>[4-6]</sup>, 特别是系统的稀有气体同位素分析还不多见. 诸如大陆富集地幔与大洋地幔是否具有类似的稀有气体丰度和同位素组成、大陆地幔的富集程度和时间如何引起稀有气体组成的变化等基本问题还没有得以阐明. 本文继宽甸、辉南和汉诺坝新生代玄武岩中幔源包体的 He 同位素组成的研究<sup>[7]</sup>之后, 对全稀有气体丰度和同位素组成进行了系统分析, 试图探讨我国东北部岩石圈地幔的稀有气体状态.

## 1 样品及分析方法

幔源包体样品采自辽宁省宽甸、吉林省辉南以及河北省汉诺坝新生代玄武岩中. 18 个所测试样品包括全岩(粒径为 3~6 mm)和从中筛选出的橄榄石或辉石矿物(粒径为 0.4~0.8 mm). 样品是在日本岗山大学固体地球研究中心进行分析的. 将约 1 g 的样品放入真空系统并在 150℃ 加热 12 小时, 以便充分脱去吸附在样品表面的大气组分的污染. 然后将其导入高真空电子轰击炉中升温至 1800℃ 融化脱出样品中的气体, 脱出的气体随后进入全金属真空净化系统将稀有气体与活性气体(如  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2$  等)分离. 之后, 依据 He, Ne, Ar, Kr 和 Xe 的气化点温度的差异, 逐次将其导入 VG5400 静态真空质谱计进行丰度和同位素

组成的测定. 以空气为工作标准, 通过所测样品和空气各同位素的峰高比较, 对未知样品进行定量. 对于丰度较高的同位素如  $^4\text{He}$ ,  $^{40}\text{Ar}$  和  $^{84}\text{Kr}$ , 用法拉第杯进行测量, 而对于其他丰度较低的同位素则用 Daly 光电倍增器或离子计数器进行测量. 实验过程中, 净化系统和质谱计的本底均较低,  $^4\text{He}$ :  $(3\sim 5) \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{g}(\text{STP})$ ;  $^{20}\text{Ne}$ :  $2 \times 10^{-12} \text{ cm}^3/\text{g}(\text{STP})$ ;  $^{40}\text{Ar}$ :  $2 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{g}(\text{STP})$ ;  $^{36}\text{Ar}$ :  $6 \times 10^{-12} \text{ cm}^3/\text{g}(\text{STP})$ ;  $^{84}\text{Kr}$ :  $9 \times 10^{-14} \text{ cm}^3/\text{g}(\text{STP})$ ;  $^{132}\text{Xe}$ :  $3 \times 10^{-14} \text{ cm}^3/\text{g}(\text{STP})$ . 对于 Ne 同位素而言,  $^{20}\text{Ne}^+$  和  $^{22}\text{Ne}^+$  中已分别扣除了来自  $^{40}\text{Ar}^{2+}$  和  $^{44}\text{CO}_2^{2+}$  的影响. 稀有气体丰度的测定误差小于 5%.

## 2 结果与讨论

我国东北部幔源包体中稀有气体丰度和同位素组成具有较大的变化范围: (1) 表 1 所示为特征稀有气体丰度的变化,  $^4\text{He}$ :  $(2\sim 250) \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{g}(\text{STP})$ ;  $^{20}\text{Ne}$ :  $(2\sim 48) \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{g}(\text{STP})$ ;  $^{36}\text{Ar}$ :  $(6\sim 180) \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{g}(\text{STP})$ ;  $^{84}\text{Kr}$ :  $(2\sim 120) \times 10^{-12} \text{ cm}^3/\text{g}(\text{STP})$ ;  $^{132}\text{Xe}$ :  $(3\sim 200) \times 10^{-13} \text{ cm}^3/\text{g}(\text{STP})$ ; (2) 所有样品中  $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  和 Ne-Kr-Xe 同位素比值均在  $2\sigma$  的分析误差范围内与大气组成一致(表 2~4); (3)  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值的变化为  $(0.016\sim 1.58) \times 10^{-5}$ (表 2); (4) 表 2 所示  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值的变化为 295.2~2324.5(其中宽甸 336.1~1294.9, 辉南 515.0~2324.5, 汉诺坝 295.2~547.5), 明显低于 MORB 的 40000<sup>[2]</sup>和古老地壳, 而接近大气比值.

图 1 表示我国东北和其他地区幔源包体以及 MORB 中  $^{36}\text{Ar}$  与其他特征稀有气体同位素的相关性. Ozima 等人<sup>[8]</sup>指出, 地幔中原始  $^{36}\text{Ar}$  近于全部脱出,

表1 我国东北部幔源包体中特征稀有气体丰度

样品	岩石类型	测定相	<sup>4</sup> He <sup>a)</sup>	<sup>20</sup> Ne	<sup>40</sup> Ar	<sup>84</sup> Kr	<sup>132</sup> Xe
			/cm <sup>3</sup> · g <sup>-1</sup> (STP)	/cm <sup>3</sup> · g <sup>-1</sup> (STP)	/cm <sup>3</sup> · g <sup>-1</sup> (STP)	/cm <sup>3</sup> · g <sup>-1</sup> (STP)	/cm <sup>3</sup> · g <sup>-1</sup> (STP)
辽宁宽甸							
C-A	二辉橄榄岩	橄榄石	5.75 × 10 <sup>-9</sup>	2.18 × 10 <sup>-11</sup>	2.98 × 10 <sup>-8</sup>	1.61 × 10 <sup>-12</sup>	3.53 × 10 <sup>-13</sup>
J-112-C3	辉岩	辉石	3.94 × 10 <sup>-9</sup>	4.78 × 10 <sup>-10</sup>	4.54 × 10 <sup>-7</sup>	1.20 × 10 <sup>-11</sup>	1.89 × 10 <sup>-12</sup>
J-20-C18	二辉橄榄岩	橄榄石	2.38 × 10 <sup>-9</sup>	5.31 × 10 <sup>-11</sup>	6.61 × 10 <sup>-8</sup>	6.38 × 10 <sup>-12</sup>	1.09 × 10 <sup>-12</sup>
J-36-C3	二辉橄榄岩	全岩	9.66 × 10 <sup>-9</sup>	4.59 × 10 <sup>-11</sup>	6.37 × 10 <sup>-8</sup>	7.17 × 10 <sup>-12</sup>	1.52 × 10 <sup>-12</sup>
吉林辉南							
A-15	二辉橄榄岩	橄榄石	6.68 × 10 <sup>-9</sup>	1.98 × 10 <sup>-11</sup>	5.06 × 10 <sup>-8</sup>	4.65 × 10 <sup>-12</sup>	7.23 × 10 <sup>-13</sup>
A-18	二辉橄榄岩	橄榄石	1.02 × 10 <sup>-7</sup>	7.12 × 10 <sup>-11</sup>	1.23 × 10 <sup>-7</sup>	2.10 × 10 <sup>-12</sup>	4.12 × 10 <sup>-13</sup>
A-21	二辉橄榄岩	橄榄石	1.10 × 10 <sup>-7</sup>	7.07 × 10 <sup>-11</sup>	1.26 × 10 <sup>-7</sup>	1.98 × 10 <sup>-12</sup>	4.57 × 10 <sup>-13</sup>
A-25	二辉橄榄岩	橄榄石	3.81 × 10 <sup>-8</sup>	2.56 × 10 <sup>-11</sup>	6.53 × 10 <sup>-8</sup>	1.71 × 10 <sup>-12</sup>	2.80 × 10 <sup>-13</sup>
A-26	二辉橄榄岩	橄榄石	6.84 × 10 <sup>-8</sup>	2.65 × 10 <sup>-11</sup>	7.53 × 10 <sup>-8</sup>	2.80 × 10 <sup>-12</sup>	4.32 × 10 <sup>-13</sup>
河北汉诺坝							
H-1	二辉橄榄岩	辉石	1.21 × 10 <sup>-8</sup>	2.12 × 10 <sup>-11</sup>	2.08 × 10 <sup>-8</sup>	2.21 × 10 <sup>-12</sup>	4.07 × 10 <sup>-13</sup>
H-1B	二辉橄榄岩	橄榄石	2.55 × 10 <sup>-8</sup>	3.24 × 10 <sup>-11</sup>	7.81 × 10 <sup>-8</sup>	7.11 × 10 <sup>-12</sup>	1.14 × 10 <sup>-12</sup>
H-3	二辉橄榄岩	橄榄石	2.17 × 10 <sup>-8</sup>	2.57 × 10 <sup>-11</sup>	2.67 × 10 <sup>-8</sup>	3.28 × 10 <sup>-12</sup>	5.89 × 10 <sup>-13</sup>
H-4	二辉橄榄岩	橄榄石	7.53 × 10 <sup>-9</sup>	3.16 × 10 <sup>-11</sup>	3.69 × 10 <sup>-8</sup>	4.51 × 10 <sup>-12</sup>	7.17 × 10 <sup>-13</sup>
X-11A	二辉橄榄岩	橄榄石	2.00 × 10 <sup>-8</sup>	2.69 × 10 <sup>-11</sup>	4.36 × 10 <sup>-8</sup>	6.82 × 10 <sup>-12</sup>	1.58 × 10 <sup>-12</sup>
X-11B	二辉橄榄岩	全岩	3.69 × 10 <sup>-8</sup>	3.33 × 10 <sup>-11</sup>	1.07 × 10 <sup>-7</sup>	1.38 × 10 <sup>-11</sup>	2.95 × 10 <sup>-12</sup>
X-14	二辉橄榄岩	橄榄石	1.18 × 10 <sup>-8</sup>	1.91 × 10 <sup>-11</sup>	2.40 × 10 <sup>-8</sup>	3.14 × 10 <sup>-12</sup>	8.68 × 10 <sup>-13</sup>
X-21	二辉橄榄岩	辉石	2.52 × 10 <sup>-7</sup>	1.74 × 10 <sup>-10</sup>	7.07 × 10 <sup>-7</sup>	1.22 × 10 <sup>-10</sup>	1.98 × 10 <sup>-11</sup>
X-22	二辉橄榄岩	橄榄石	1.19 × 10 <sup>-8</sup>	1.89 × 10 <sup>-11</sup>	2.53 × 10 <sup>-8</sup>	3.90 × 10 <sup>-12</sup>	8.31 × 10 <sup>-13</sup>

a) 引自文献[7]

表2 我国东北部幔源包体中 He, Ne, Ar 同位素组成<sup>a)</sup>

样品	<sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He <sup>b)</sup>	<sup>20</sup> Ne/ <sup>22</sup> Ne	<sup>21</sup> Ne/ <sup>22</sup> Ne	<sup>40</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar	<sup>38</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar
C-A	(12.69 ± 0.50) × 10 <sup>-6</sup>	11.29 ± 0.17	0.0318 ± 0.0129	336.1 ± 0.3	0.1878 ± 0.0005
J-112-C3	(15.78 ± 0.14) × 10 <sup>-6</sup>	9.80 ± 0.04	0.0298 ± 0.0010	1294.9 ± 1.4	0.1876 ± 0.0007
J-20-C18	(12.52 ± 0.08) × 10 <sup>-6</sup>	10.85 ± 0.17	0.0418 ± 0.0408	379.5 ± 0.4	0.1880 ± 0.0005
J-36-C3	(12.58 ± 0.03) × 10 <sup>-6</sup>	9.89 ± 0.14	0.0199 ± 0.0099	416.7 ± 0.3	0.1875 ± 0.0004
A-15	(6.08 ± 0.10) × 10 <sup>-6</sup>	10.06 ± 0.22	0.0345 ± 0.0050	515.0 ± 0.5	0.1885 ± 0.0005
A-18	(8.71 ± 0.02) × 10 <sup>-6</sup>	9.95 ± 0.13	0.0304 ± 0.0017	2141.2 ± 2.8	0.1882 ± 0.0008
A-21	(9.06 ± 0.02) × 10 <sup>-6</sup>	9.93 ± 0.14	0.0314 ± 0.0016	2324.5 ± 2.6	0.1876 ± 0.0015
A-25	(9.18 ± 0.02) × 10 <sup>-6</sup>	9.74 ± 0.16	0.0342 ± 0.0041	1044.9 ± 0.9	0.1881 ± 0.0004
A-26	(9.04 ± 0.02) × 10 <sup>-6</sup>	9.86 ± 0.13	0.0344 ± 0.0082	774.1 ± 1.0	0.1877 ± 0.0005
H-1	(2.12 ± 0.01) × 10 <sup>-6</sup>	9.66 ± 0.15	0.0381 ± 0.0057	320.6 ± 0.3	0.1868 ± 0.0006
H-1B	(1.22 ± 0.01) × 10 <sup>-6</sup>	9.74 ± 0.09	0.0334 ± 0.0030	547.5 ± 0.5	0.1884 ± 0.0005
H-3	(1.82 ± 0.01) × 10 <sup>-6</sup>	9.50 ± 0.22	0.0296 ± 0.0049	295.2 ± 0.2	0.1876 ± 0.0004
H-4	(1.71 ± 0.01) × 10 <sup>-6</sup>	9.71 ± 0.26	0.0447 ± 0.0087	305.6 ± 0.3	0.1878 ± 0.0004
X-11A	(1.61 ± 0.01) × 10 <sup>-6</sup>	9.84 ± 0.13	0.0376 ± 0.0090	325.2 ± 0.3	0.1883 ± 0.0005
X-11B	(0.830 ± 0.006) × 10 <sup>-6</sup>	9.56 ± 0.18	0.0275 ± 0.0099	415.2 ± 0.4	0.1890 ± 0.0004
X-14	(2.10 ± 0.01) × 10 <sup>-6</sup>	9.62 ± 0.15	0.0307 ± 0.0050	320.9 ± 0.3	0.1882 ± 0.0004
X-21	(0.162 ± 0.001) × 10 <sup>-6</sup>	9.76 ± 0.12	0.0269 ± 0.0009	407.4 ± 0.4	0.1889 ± 0.0004
X-22	(2.85 ± 0.02) × 10 <sup>-6</sup>	—	—	306.7 ± 0.8	0.1884 ± 0.0004
大气	1.40 × 10 <sup>-6</sup>	9.80	0.029	295.5	0.1880

a) 误差为 1σ; b) 引自文献[7]

表 3 我国东北部幔源包体中 Kr 同位素组成<sup>a)</sup>

样品	<sup>78</sup> Kr/ <sup>84</sup> Kr	<sup>80</sup> Kr/ <sup>84</sup> Kr	<sup>82</sup> Kr/ <sup>84</sup> Kr	<sup>83</sup> Kr/ <sup>84</sup> Kr	<sup>86</sup> Kr/ <sup>84</sup> Kr
C-A	0.00639 ± 0.00022	0.04096 ± 0.00428	0.2031 ± 0.0035	0.2015 ± 0.0027	0.3088 ± 0.0173
J-112-C3	0.00614 ± 0.00020	0.04136 ± 0.00028	0.2039 ± 0.0008	0.2039 ± 0.0009	0.3099 ± 0.0013
J-20-C18	0.00604 ± 0.00014	0.04027 ± 0.00093	0.2027 ± 0.0018	0.2031 ± 0.0012	0.3068 ± 0.0027
J-36-C3	0.00601 ± 0.00013	0.03963 ± 0.00034	0.2031 ± 0.0017	0.2023 ± 0.0010	0.3080 ± 0.0021
A-15	0.00602 ± 0.00019	0.03981 ± 0.00064	0.2023 ± 0.0022	0.2022 ± 0.0027	0.3078 ± 0.0012
A-18	0.00606 ± 0.00045	0.04092 ± 0.00053	0.2022 ± 0.0021	0.2025 ± 0.0023	0.3070 ± 0.0022
A-21	0.00612 ± 0.00236	0.04075 ± 0.00099	0.2029 ± 0.0015	0.2017 ± 0.0022	0.3071 ± 0.0012
A-25	0.00617 ± 0.00031	0.04082 ± 0.00099	0.2027 ± 0.0028	0.2023 ± 0.0018	0.3064 ± 0.0040
A-26	0.00629 ± 0.00029	0.04000 ± 0.00069	0.2032 ± 0.0021	0.2010 ± 0.0021	0.3050 ± 0.0027
H-1	0.00631 ± 0.00017	0.04064 ± 0.00105	0.2044 ± 0.0055	0.2014 ± 0.0035	0.3076 ± 0.0036
H-1B	0.06194 ± 0.00046	0.04027 ± 0.00064	0.2029 ± 0.0025	0.2026 ± 0.0019	0.3082 ± 0.0017
H-3	0.00600 ± 0.00108	0.03978 ± 0.00089	0.2030 ± 0.0019	0.2028 ± 0.0029	0.3073 ± 0.0036
H-4	0.00613 ± 0.00009	0.04063 ± 0.00096	0.2036 ± 0.0017	0.2021 ± 0.0021	0.3087 ± 0.0023
X-11A	0.00615 ± 0.00034	0.03964 ± 0.00050	0.2031 ± 0.0012	0.2025 ± 0.0016	0.3084 ± 0.0020
X-11B	0.00619 ± 0.00015	0.04014 ± 0.00050	0.2037 ± 0.0010	0.2027 ± 0.0010	0.3088 ± 0.0018
X-14	0.00616 ± 0.00024	0.03985 ± 0.00146	0.2021 ± 0.0019	0.2018 ± 0.0042	0.3079 ± 0.0028
X-21	0.00622 ± 0.00044	0.04134 ± 0.00102	0.2156 ± 0.0017	0.2153 ± 0.0030	0.3265 ± 0.0032
X-22	0.00609 ± 0.00021	0.03996 ± 0.00050	0.2033 ± 0.0013	0.2030 ± 0.0021	0.3086 ± 0.0036
大气	0.00608	0.03960	0.2022	0.2014	0.3051

a) 误差为 1σ

表 4 我国东北部幔源包体中 Xe 同位素组成<sup>a)</sup>

样品	<sup>124</sup> Xe/ <sup>130</sup> Xe	<sup>126</sup> Xe/ <sup>130</sup> Xe	<sup>128</sup> Xe/ <sup>130</sup> Xe	<sup>129</sup> Xe/ <sup>130</sup> Xe	<sup>131</sup> Xe/ <sup>130</sup> Xe	<sup>132</sup> Xe/ <sup>130</sup> Xe	<sup>134</sup> Xe/ <sup>130</sup> Xe	<sup>136</sup> Xe/ <sup>130</sup> Xe
C-A	0.0242 ± 0.0036	0.0212 ± 0.0034	0.4726 ± 0.0177	6.536 ± 0.107	5.261 ± 0.102	6.625 ± 0.084	2.569 ± 0.065	2.191 ± 0.043
J-112-C3	0.0244 ± 0.0013	0.0222 ± 0.0011	0.4715 ± 0.0071	6.536 ± 0.049	5.221 ± 0.057	6.575 ± 0.051	2.545 ± 0.030	2.184 ± 0.020
J-20-C18	0.0248 ± 0.0020	0.0219 ± 0.0012	0.4701 ± 0.0059	6.459 ± 0.068	5.209 ± 0.054	6.601 ± 0.091	2.552 ± 0.036	2.168 ± 0.024
J-36-C3	0.0233 ± 0.0011	0.0208 ± 0.0016	0.4641 ± 0.0064	6.437 ± 0.087	5.195 ± 0.056	6.584 ± 0.057	2.541 ± 0.030	2.168 ± 0.027
A-15	0.0263 ± 0.0029	0.0215 ± 0.0032	0.4720 ± 0.0156	6.544 ± 0.119	5.215 ± 0.070	6.585 ± 0.086	2.566 ± 0.037	2.191 ± 0.024
A-18	0.0278 ± 0.0021	0.0223 ± 0.0018	0.4702 ± 0.0101	6.527 ± 0.128	5.138 ± 0.093	6.490 ± 0.126	2.518 ± 0.053	2.164 ± 0.061
A-21	0.0290 ± 0.0029	0.0216 ± 0.0021	0.4799 ± 0.0094	6.597 ± 0.143	5.231 ± 0.097	6.602 ± 0.092	2.557 ± 0.045	2.193 ± 0.039
A-25	0.0229 ± 0.0030	0.0239 ± 0.0032	0.4732 ± 0.0224	6.585 ± 0.154	5.238 ± 0.136	6.645 ± 0.131	2.584 ± 0.062	2.185 ± 0.073
A-26	0.0294 ± 0.0032	0.0233 ± 0.0020	0.4756 ± 0.0227	6.569 ± 0.176	5.200 ± 0.095	6.614 ± 0.139	2.579 ± 0.034	2.195 ± 0.025
H-1	0.0298 ± 0.0030	0.0247 ± 0.0021	0.4729 ± 0.0084	6.566 ± 0.086	5.254 ± 0.065	6.632 ± 0.093	2.584 ± 0.034	2.185 ± 0.029
H-1B	0.0242 ± 0.0017	0.0214 ± 0.0016	0.4706 ± 0.0104	6.508 ± 0.095	5.213 ± 0.077	6.622 ± 0.055	2.540 ± 0.036	2.184 ± 0.019
H-3	0.0272 ± 0.0040	0.0221 ± 0.0018	0.4762 ± 0.0110	6.555 ± 0.068	5.298 ± 0.065	6.634 ± 0.106	2.595 ± 0.023	2.196 ± 0.032
H-4	0.0299 ± 0.0035	0.0248 ± 0.0051	0.4702 ± 0.0239	6.496 ± 0.130	5.249 ± 0.143	6.666 ± 0.164	2.561 ± 0.058	2.171 ± 0.054
X-11A	0.0243 ± 0.0015	0.0213 ± 0.0015	0.4685 ± 0.0101	6.481 ± 0.094	5.218 ± 0.059	6.642 ± 0.080	2.572 ± 0.049	2.202 ± 0.018
X-11B	0.0234 ± 0.0014	0.0215 ± 0.0013	0.4740 ± 0.0075	6.500 ± 0.053	5.223 ± 0.037	6.624 ± 0.043	2.560 ± 0.019	2.193 ± 0.023
X-14	0.0260 ± 0.0018	0.0214 ± 0.0023	0.4789 ± 0.0095	6.496 ± 0.075	5.279 ± 0.072	6.664 ± 0.070	2.577 ± 0.049	2.210 ± 0.035
X-21	0.0223 ± 0.0008	0.0218 ± 0.0008	0.4726 ± 0.0058	6.415 ± 0.050	5.193 ± 0.031	6.565 ± 0.040	2.563 ± 0.013	2.185 ± 0.009
X-22	0.0219 ± 0.0050	0.0217 ± 0.0054	0.4739 ± 0.0089	6.652 ± 0.115	5.208 ± 0.099	6.643 ± 0.148	2.589 ± 0.084	2.205 ± 0.067
大气	0.0234	0.0218	0.4715	6.496	5.213	6.607	2.563	2.176

a) 误差为 1σ

取而代之的是二次来源的大气成因  $^{36}\text{Ar}$ . 从图 1(a)中可以看到, 类似其他地区<sup>[1-6]</sup>, 宽甸和辉南样品中  $^{36}\text{Ar}$  与  $^4\text{He}$  之间没有明显的相关关系, 它暗示两者的异源性. 然而, 汉诺坝样品中  $^{36}\text{Ar}$  与  $^4\text{He}$  之间则存在着较好的正相关性(相关系数为 0.996), 可能反映了两者的同源性. 在图1(b)中, 宽甸和汉诺坝样品的  $^{36}\text{Ar}$  与  $^{20}\text{Ne}$  具有较好的正相关性, 而辉南样品则具有负相关性. 但是, 如果除去具有较高  $^{20}\text{Ne}$  的两个样品的话(宽甸的 J-112-C3 和汉诺坝的 X-21), 其他样品的变化范围则较小, 因而  $^{20}\text{Ne}$  和  $^{36}\text{Ar}$  之间的相关性也就变得比较模糊. 此外, 3 个地区样品中  $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{84}\text{Kr}$  和  $^{132}\text{Xe}$  均具有较好的正相关性(图 1(c), (d)). 根据这些特征稀有气体丰度和同位素组成的结果, 可以归结我国东北部幔源包体中 Ne, Kr 和 Xe 主要起源于大气. 但与 MORB<sup>[2-4]</sup>或其他地区幔源包体(欧洲大陆<sup>[4]</sup>、澳大利亚<sup>[5]</sup>以及日本<sup>[6]</sup>)相比, 本文所研究地区幔源包体样品具有较低的稀有气体丰度, 尤以轻稀有气体

He-Ne-Ar 较为明显.

图 2 表示了我国及其他地区幔源包体中 He 和 Ar 同位素比值的相关关系. 图中 A-P, A-M 和 A-C 所示曲线分别代表大气组分与地幔热柱(Plume)、MORB 和地壳组分的混合线. 宽甸样品类似澳大利亚样品<sup>[5]</sup>, 位于大气与 MORB 的混合线上, 从而清楚地表明其源区为类似 MORB 的亏损地幔. 这一认识与基于该地区玄武岩和包体的 Sr, Nd, Pb 同位素的结果得到的结论一致<sup>[9]</sup>. 虽然宽甸地区  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值类似 MORB, 反映了岩石圈地幔具有类似 MORB 源区的  $^3\text{He}/(\text{U} + \text{Th})$  比值, 但其  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值(336.1~1294.9)远远小于 MORB 的 40000<sup>[2]</sup>, 表明了该区地幔中有大量的大气组分混入. 需要指出的是, 由于大气组分中 Ar 的丰度( $9300 \times 10^{-6}$ )远远大于 He( $5.24 \times 10^{-6}$ ), 所以, 大量的大气组分的加入并没有明显地导致原始  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值的改变. 此外, 宽甸样品中  $^4\text{He}$  与放射性成因  $^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}(=(^{36}\text{Ar})_{\text{实测}} \times ((^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{实测}} - (^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{大气}}))$

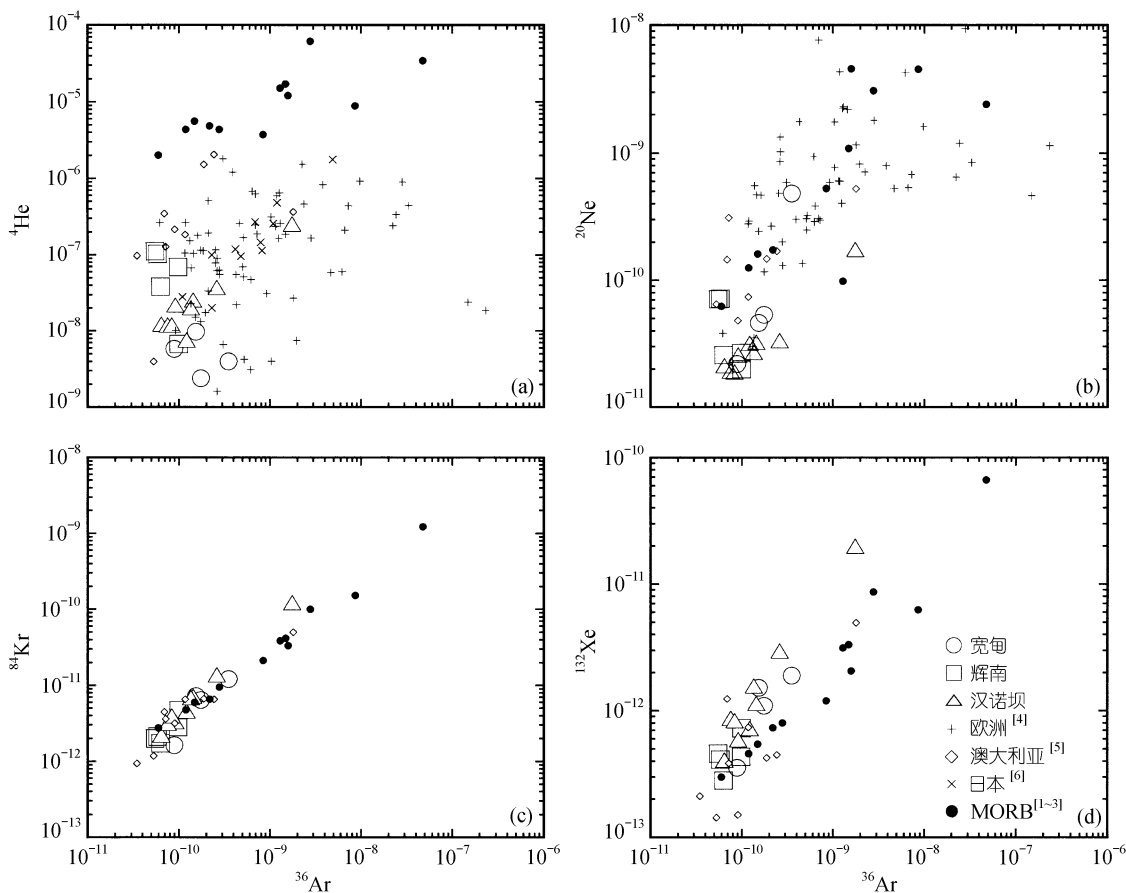


图 1 我国东北部幔源包体中特征稀有气体丰度变化及其相关关系  
单位:  $\text{cm}^3/\text{g}$  (STP)

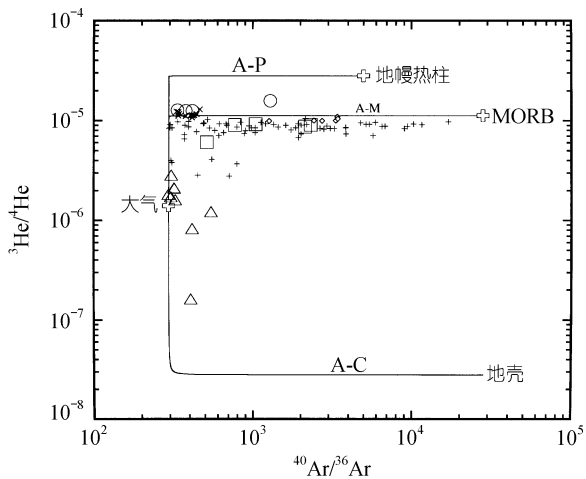


图 2 我国东北部幔源包体中 He 和 Ar 同位素组成  
图例同图 1

的比值为 0.01, 0.2, 0.5 和 1.6, 均小于 MORB 的 2.1<sup>[3]</sup>. 这一低  $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}$  比值可能主要反映了 He 和 Ar 之间由于熔体中溶解度的差异而导致的多阶段元素分馏, 或者岩石圈地幔相对于 MORB 源区具有较低的 (U + Th)/K 比值. 后者有待于今后对包体的微量元素的研究加以阐明.

辉南样品类似欧洲大陆<sup>[4]</sup>, 位于 A-M 混合线的下侧, 相对于 MORB 富集放射性成因 He 和大气成因 Ar. 低  $^3\text{He}/^4\text{He}$  (或者  $^3\text{He}/(\text{U} + \text{Th})$ ) 比值可能主要与岩石圈地幔的富集有关, 尽管它也可能由岩石圈地幔较高的脱气程度所引起.  $^3\text{He}/^4\text{He}$  和  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值与地幔的富集程度和时间密切相关, 但无论地幔的富集程度的高低或富集时间的长短, 都会导致富集地幔相对于 MORB 源区富集放射性成因  $^4\text{He}$  和  $^{40}\text{Ar}$ . 从辉南的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值, 我们可估算该区富集地幔的  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  和  $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$  比值. 辉南的平均  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值为  $9 \times 10^{-6}$ , 其放射性成因成分高于 MORB ( $11.2 \times 10^{-6}$ ) 约 20%. 假设最近 1 Ga 期间  $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$  放射性衰变率为  $5^{[8]}$ , MORB 的  $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$  为 2.1<sup>[3]</sup>, 我们可认为富集地幔中  $^3\text{He}/^4\text{He}$  的变化速度是  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  的 2.4 倍. 这样, 辉南地区幔源  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  应比 MORB 源区具有高于 8% 的放射性成因成分, 即辉南地区幔源  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  约为 43000. 将此值代入下式估算  $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$  比值:  $^4\text{He}/^{40}\text{Ar} = (^3\text{He}/^{36}\text{Ar}) \times (^4\text{He}/^3\text{He}) \times (^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar})$ . 式中  $^3\text{He}$  和  $^{36}\text{Ar}$  均与地幔富集过程无关, 其  $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$  比值应与 MORB (0.4~0.7<sup>[11]</sup>) 相同. 据此我们可得到该区富集地幔的  $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$  比值为 1.0~1.8. 这一比值与实测辉南样品的  $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}$  比值 (0.8~1.5) 相似.

图 3 表示了所测样品中  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  和  $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$  之间的相关性, 两者的回归线性方程为:  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = (339 \pm 145) + (110796 \pm 12810) \times ^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$ , 这一线性关系明显地反映了两个端员组分的混合, 即低  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  和  $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$  的大气组分和高  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  和  $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$  的幔源组分的混合. 将上述 MORB  $^3\text{He}/^{36}\text{Ar} = 0.4\sim 0.7$  代入该式计算得到的幔源  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值, 在误差范围内与以上估算得到的富集地幔值 (43000) 接近. 因此, 辉南样品中 He 和 Ar 同位素的相关性反映了大气与富集地幔组分的混合.

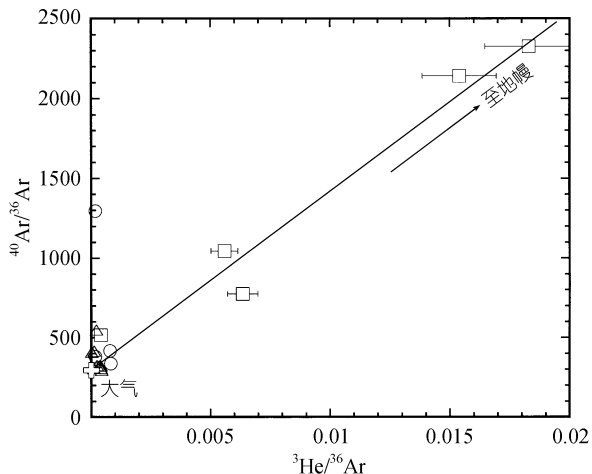


图 3 我国东北部幔源包体中  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  和  $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$  的相关关系 (图例同图 1)

类似消减带地区<sup>[6]</sup>, 汉诺坝样品中  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  变化为 295.2~547.5, 明显地低于宽甸和辉南两地. 在图 2 中除低于大气  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值的 3 个样品以外, 汉诺坝样品主要集中在大气端员组分的附近. 虽然对汉诺坝样品的解释存在多解性<sup>[7]</sup>, 图 1(a) 中  $^4\text{He}-^{36}\text{Ar}$  间的正相关性可能暗示汉诺坝样品中低而且分散的 He 同位素变化主要来自于大气成分的加入, 而非 Procelli 等人<sup>[10]</sup>所述玄武岩喷出地表后包体中放射性 U, Th 元素的衰变所致. 因为玄武岩和包体的微量元素 Sr, Rb 和 Pb 同位素地球化学研究表明汉诺坝地区富集地幔的存在<sup>[11]</sup>, 所以, 我们初步推测该区地幔富集过程中可能有大量水的参与, 即 U 和 Th 元素的富集导致地幔具有较低的  $^3\text{He}/(\text{U} + \text{Th})$  比值, 而水的存在则导致  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值接近大气值.

综上所述, He 和 Ar 同位素体系反映了我国东北部岩石圈地幔具有不均一性和大气成因组分的存在. 前者包括类似宽甸的亏损地幔和类似辉南的富集地

幔。幔源包体样品中大量的大气成因 Ar 的存在,可能源自样品收集和实验处理过程,也可能随玄武岩喷出地表时大气组分的加入如海底玄武岩喷出时海水的加入,或地质历史过程中由板块消减作用带入地幔并得以保存至今的大气组分。到目前为止,清楚地区别这些过程似乎比较困难。然而,Matsumoto 等人<sup>[6]</sup>近来综合不同产地的大陆幔源包体中稀有气体数据,发现地球原始气体  $^3\text{He}$  与大气成因  $^{36}\text{Ar}$  之间存在着正相关性,从而提出在地球演化早期由板块消减作用带入地幔并得以保存至今的大气组分可能是大陆地幔中普遍存在的组分之一。由于本文中  $^3\text{He}$  变化较小,难以清楚地反映  $^3\text{He}$  与  $^{36}\text{Ar}$  之间的相关性,所以,这一“普遍性”是否存在于我国大陆岩石圈,有待通过今后更多、更大范围的分析工作来加以阐明。

**致谢** 本工作受国家攀登计划(95-预-39)资助。

### 参 考 文 献

- 1 Moreira M, Kunz J, Allègre C. Rare gas systematics in poppong rock: isotopic and elemental compositions in the upper mantle. *Science*, 1998, 279: 1178~1181
- 2 Burnard P, Graham D, Turner G. Vesicle-specific noble gas

- analysis of "poppong rock": Implications for primordial noble gases in Earth. *Science*, 1997, 276: 568~571
- 3 Staudacher T, Sarda P, Richardson S, et al. Noble gases in basalt glasses from a Mid-Atlantic Ridge topographic high at 14°N: Geodynamic consequences. *Earth Plant Sci Lett*, 1989, 96: 119~133
- 4 Dunai T, Baur H. Helium, neon and argon systematics of European subcontinental mantle: Implication for its geochemical evolution. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 2767~2778
- 5 Matsumoto T, Honda M, McDougall I, et al. Noble gases in pyroxenites and metasomatised peridotites from the Newer Volcanics, southeastern Australia: Implications for mantle metasomatism. *Chem Geol*, 2000, 168: 49~73
- 6 Matsumoto T, Chen Y, Matsuda J. Concomitant occurrence of primordial and recycled noble gases in the Earth's mantle. *Earth Plant Sci Lett*, 2001, 185: 35~47
- 7 徐胜, 刘丛强. 中国东部幔源包体的氦同位素组成及其地幔地球化学演化意义. *科学通报*, 1997, 42(11): 1190~1193
- 8 Ozima M, Podosek F. *Noble Gas Geochemistry*. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1983
- 9 刘丛强, 增田彰正, 解广轰. 辽宁宽甸黄椅山玄武岩地幔包体的 REE 和 Sr, Nd 同位素地球化学. *地质科学*, 1994, 28(3): 228~234
- 10 Porcelli D R, O'Nions R K, O'Reilly S Y. Helium and strontium isotopes in ultramafic xenoliths. *Chem Geol*, 1986, 54: 237~249
- 11 陈道公, 支霞臣, 李彬贤. 汉诺坝玄武岩中辉石岩类包体 Nd, Sr, Pb 同位素及其成因信息. *地球化学*, 1997, 26(1): 1~11

(2001-07-27 收稿, 2001-10-24 收修改稿)