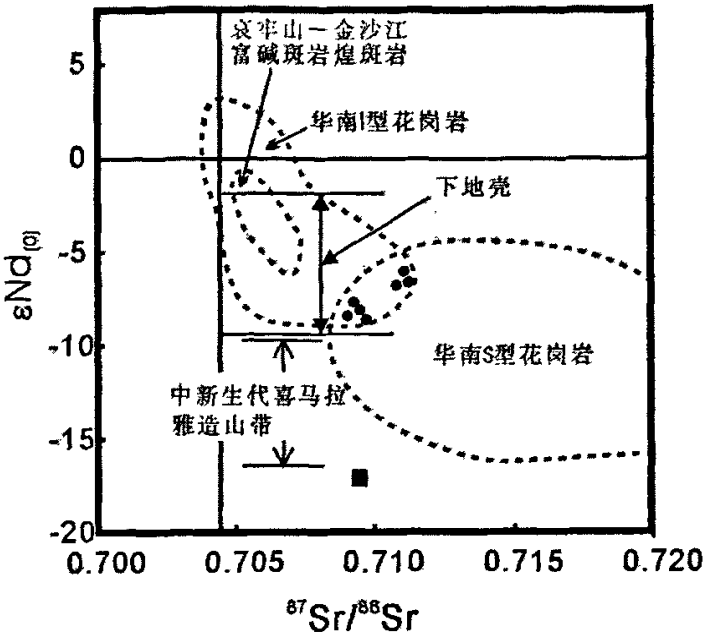


图 6－1　大坪金矿白钨矿的$(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ - ε $Nd_{(0)}$关系图.

图中华南花岗岩数据据文献［228]；哀牢山－金沙江富碱斑岩、煌斑岩数据据据文献[42]；中新生代喜马拉雅造山带 ε Nd 引自文献[229]；下地壳范围来自文献[230].

●为本次分析的大坪金矿白钨矿投影点。

6.2.2 大坪白钨矿的惰性气体同位素体系

6.2.2.1 引言

近年来，惰性气体同位素体系被广泛应用于成矿物质和成矿过程的示踪研究，取得了许多其他方法无法获得的重要信息[9,231~243]，其主要原因在于惰性气体同位素体系在水/岩反应中基本保持不变，同时不同来源的成矿流体惰性同位素组成差异甚大，因此可以反映成矿流体来源和演化过程的原始信息。本文以大坪金矿为典型矿例，采用超高真空气相质谱系统测定其中白钨矿惰性气体同位素组成，并据此初步讨论了大坪金矿的成因机制和流体来源。

6.2.2.2 样品和分析方法

鉴于白钨矿是大坪金矿中最早晶出的矿石矿物，其中流体包裹体可以在最大程度上反映成矿流体的原始信息，因此本文选择白钨矿进行测定。单矿物样

品的挑选和准备工作同上。

本文样品分析在中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室完成，测试仪器为英国 Micromass 公司生产的 MM5400 型气体质谱仪，实验条件为：发射电流 It_4=800Ma，It_{40}=200μA，高压为 9.000kV。实验流程：将样品称重后用铝箔包好置于样品台中，随后密封抽真空，当压力达 1×10^{-5}Pa 时，加热样品到 130℃并烘烤 10*h* 以上，以除去样品表面吸附和次生包裹体中的气体，后用电阻炉加热熔样坩锅中样品至 1000℃，释放出的气体被吸入超真空气体净化系统，在液氮温度下用活性碳阱将惰性气体分离为 He+Ne 和 Ar+Kr+Xe 两部分，然后分别送进气体质谱仪测定其同位素组成. MM5400 型气体质谱仪的最低热本底值为：^{4}He=5.0×10^{-12}cm^{3}STP/g; ^{40}Ar=9.0×10^{-10}cm^{3}STP/g; ^{84}Kr=4.8×10^{-14}cm^{3}STP/g; ^{132}Xe=4.0×10^{-14}cm^{3}STP/g. 使用的标样为兰州市皋兰山顶空气(AIRLZ2003)，各惰性气体同位素组成测定误差小于 10%。具体测定过程参见叶先仁等[244]。

6.2.2.3 结果和讨论

大坪金矿 7 个白钨矿惰性气体同位素组成分析结果见表 6-2，从中可见：(1) 白钨矿中特征惰性气体组成较为一致，其各自变化范围分别是：^{4}He: (3.942 ~ 10.528)×10^{-6}cm^3(STP/g); ^{20}Ne: (6.5E-06 ~ 0.383)×10^{-8}cm^3(STP/g); ^{40}Ar: (1.546 ~ 5.376)× 10^{-6} cm^3 (STP/g); ^{84}Kr: (0.034 ~ 0.952)×10^{-10}cm^3(STP/g); ^{132}Xe: (0.9 ~ 4.3)×10^{-13} cm^3(STP/g)，表明它们基本是在同一地质过程中形成的; (2) ^{3}He/^{4}He 比值(R)变化不大，为(0.988 ~ 1.424)×10^{-6}，平均 1.205×10^{-6}，相应的 *R/Ra*(*Ra* 为大气的 ^{3}He/^{4}He 比值，一般取 1.399×10^{-6}) 为 0.706 ~ 1.018，平均 0.898，略低于大气 *R/Ra* 值，而 ^{40}Ar/^{36}Ar 为 1801.8 ~ 2663.8，平均为 2085，远高于大气 ^{40}Ar/^{36}Ar(295.5); (3) ^{20}Ne/^{22}Ne 为 9.600 ~ 11.56，平均 11.12，高于大气值(9.8)，而 ^{21}Ne/^{22}Ne 为 0.028 ~ 0.0467，平均 0.0341，亦高于大气 ^{21}Ne/^{22}Ne 比值(0.029).

6.2.2.3.1 He-Ar 同位素体系

前人研究表明：流体包裹体中的惰性气体同位素组成可以用来区别 3 种不同来源的成矿流体：1.大气饱和水（ASW），主要包括大气降水和海水，其标准

表 6-2 大坪金矿含金石英脉中白钨矿流体包裹体惰性气体同位素组成*

样　号	04101	04107	04113	04114	04129	04130	04132	大 气
采样位置	51 号矿脉	6 号矿脉	6 号矿脉	6 号矿脉	8 号矿脉	8 号矿脉	8 号矿脉	
$^{4}He(10^{-8}cm^{3}STP/g)$	768.320(23)	394.24(12)	510.72(15)	965.440(29)	842.240(26)	826.560(25)	1052.800(31)	
$^{20}Ne(10^{-8}cm^{3}STP/g)$	6.5E-06(2)	0.028(78)	0.383(97)	0.058(14)	0.090(21)	0.056(14)	0.363(78)	
$^{40}Ar(10^{-6}cm^{3}STP/g)$	3.517(11)	1.546(46)	1.474(44)	3.651(11)	4.906(15)	4.973(15)	5.376(16)	
$^{84}Kr(10^{-10}cm^{3}STP/g)$	0.450(16)	0.379(16)	0.034(22)	0.564(28)	0.726(31)	0.952(47)	0.358(26)	
$^{132}Xe(10^{-10}cm^{3}STP/g)$	0.023(11)	0.012(44)	0.009(50)	0.020(83)	0.033(13)	0.043(18)	0.021(95)	
$^{3}He/^{4}He(10^{-6})(R)$	1.364(18)	1.067(11)	0.988(18)	1.424(27)	1.193(27)	1.350(19)	1.047(22)	1.399
R/Ra	0.975	0.763	0.706	1.018	0.853	0.965	1.006	1
$^{20}Ne/^{22}Ne$	11.460(75)	11.56(78)	10.670(63)	13.04(87)	10.380(40)	11.12(45)	9.600(37)	9.8
$^{21}Ne/^{22}Ne$	0.031(17)	0.0467(29)	0.034(19)	0.036(24)	0.028(93)	0.030(10)	0.033(14)	0.029
$^{38}Ar/^{36}Ar$	0.188(16)	0.1887(28)	0.191(27)	0.196(48)	0.198(21)	0.194(29)	0.185(34)	0.188
$^{40}Ar/^{36}Ar$	2663.8(131)	1223.3(225)	2298.1(260)	1801.8(991)	1948.2(711)	2021.0(800)	2640.3(351)	295.5
$^{82}Kr/^{84}Kr$	0.213(62)	0.193(96)	0.205(36)	0.169(77)	0.206(13)	0.194(97)	0.197(15)	0.2022
$^{83}Kr/^{84}Kr$	0.200(11)	0.182(76)	0.210(18)	0.182(58)	0.188(60)	0.199(67)	0.201(20)	0.2014
$^{86}Kr/^{84}Kr$	0.316(77)	0.279(94)	0.298(25)	0.295(18)	0.317(14)	0.310(85)	0.283(13)	0.3052
$^{128}Xe/^{132}Xe(10^{-2})$	0.070(59)	0.069(69)	0.073(16)	0.077(53)	0.086(45)	0.078(29)	0.078(22)	0.0714
$^{129}Xe/^{132}Xe$	1.000(15)	1.019(23)	1.054(55)	1.031(40)	1.017(16)	1.017(21)	1.060(31)	0.9832
$^{130}Xe/^{132}Xe$	0.150(71)	0.165(10)	0.162(67)	0.147(62)	0.148(59)	0.152(66)	0.168(90)	0.1514
$^{131}Xe/^{132}Xe$	0.785(13)	0.814(25)	0.753(50)	0.801(20)	0.805(15)	0.780(19)	0.800(25)	0.789
$^{134}Xe/^{132}Xe$	0.3984(81)	0.394(14)	0.394(41)	0.405(26)	0.389(14)	0.403(14)	0.692(36)	0.3879
$^{136}Xe/^{132}Xe$	0.387(14)	0.338(90)	0.301(27)	0.390(62)	0.398(12)	0.364(89)	0.462(23)	0.3294

*数据后刮号中数值为最后位数字的 1σ 偏差。

$^3He/^4He$ 和 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 同位素组成分别为 $1R_a$ 和 295.5；2. 深源地幔流体，其标准 $^3He/^4He$ 和 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 值分别应为 6 ~ 9R_a 和>40000；3. 地壳流体，包括建造水或盆地热卤水，其特征性 $^3He/^4He$ 和 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 组成分别应为 0.01 ~ 0.05R_a 和 >295.5[6]。从图 6-2 和图 6-3 中可见，大坪白钨矿均主要落在地幔 He 和地壳 He 之间，而相对远离海底热水（A）和大气饱和水（ASW），图 6-4 上可见大坪白钨矿也主要落在地壳流体和地幔流体之间，相似于斑岩铜矿成矿流体范围，与 MVT 型矿床有较大的区别，显示大坪金矿成矿流体主要为深源地幔流体和地壳流体的混合水。图 6-4 还显示：相对于斑岩铜矿，大坪成矿流体 *R/Ra* 基本一致，而 $^{40}Ar^*/^4He$ 较低，说明大坪金矿成矿流体中基本不存在大气饱和水。

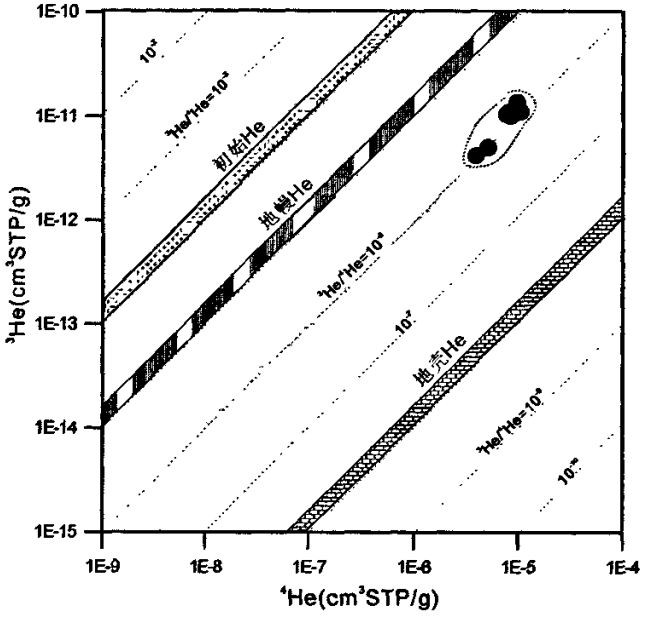


图 6-2 大坪白钨矿流体包裹体 ^4He-^3He 图.

图中●为大坪白钨矿投点(据文献［247］改编)

6.2.2.3.2 Ne 同位素体系

不同来源的 Ne 具有不同的同位素组成：大气中 $^{20}Ne/^{22}Ne$ 为 9.8，$^{21}Ne/^{22}Ne$ 为 0.029；原始(太阳风)Ne 的 $^{20}Ne/^{22}Ne$ 和 $^{21}Ne/^{22}Ne$ 分别为 13.5 ~ 14.0 和 0.0305 ~ 0.034，地幔 Ne 的同位素组成与原始 Ne 相似；地幔流体的 $^{20}Ne/^{22}Ne$ 和 $^{21}Ne/^{22}Ne$ 分别为 9.8~13.2 和 0.058 ~ 0.068，而地壳中 Ne 的 $^{20}Ne/^{22}Ne$ 和 $^{21}Ne/^{22}Ne$ 组成分别为 0 ~ 0.3 和 0.1 ~ 0.47[245]，因此不同来源的 Ne 具有不同的演化规律。 图 6－5 上可见，大坪白钨矿 $^{20}Ne/^{22}Ne$ 和 $^{21}Ne/^{22}Ne$ 变化范围变化地幔 Ne 的演化线上及其附近，不见地壳 Ne 所特有的 $^{20}Ne/^{22}Ne$ 与 $^{21}Ne/^{22}Ne$ 之间负相关性，显示大坪金矿成矿流体中的 Ne 应主要来源于地幔去气。图 6-6

中可见，大坪白钨矿基本落在地幔流体和大气混合线以外，同样显示大坪金矿成矿流体中除深源地幔流体外，有富 ^{40}Ar 的地壳流体的加入。

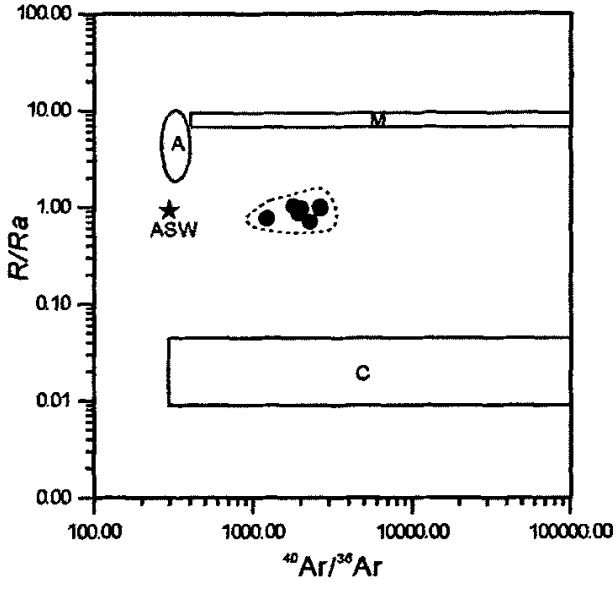


图 6-3 大坪白钨矿 $^{40}Ar/^{36}Ar$—*R/Ra* 图.

图中: ASW 为大气饱和水; A 为红海和大西洋中脊 TAG 地区海底热水范围(据文献[238,240] 改编); M 为地幔流体范围; C 为地壳流体范围。样品符号与图 6-2 同.

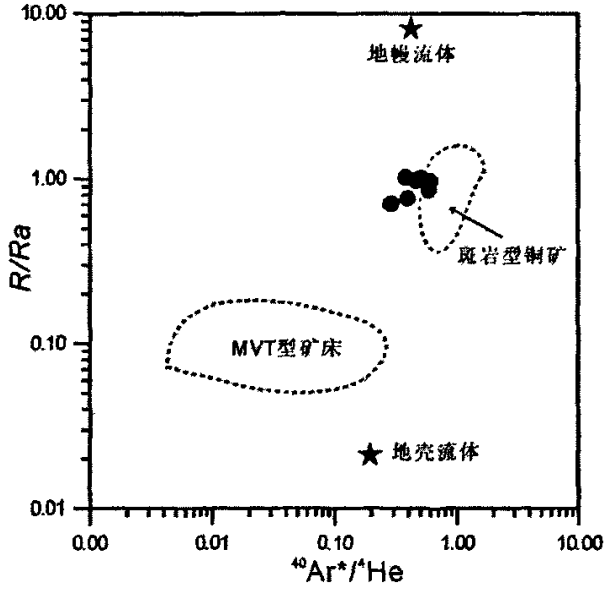


图 6-4 大坪白钨矿 $^{40}Ar^*/^4He$—*R/Ra* 图. 图中●为大坪白钨矿投点(据文献[246]改编). $^{40}Ar^*$ 为经过大气 Ar 校正的放射性成因 ^{40}Ar，$^{40}Ar^*= {}^{36}Ar(^{40}Ar/^{36}Ar\text{-}295.5)$.

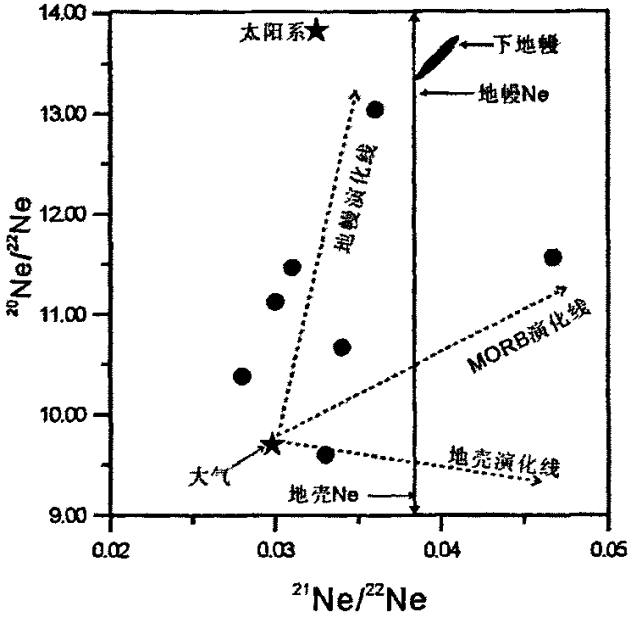


图 6-5 大坪白钨矿 $^{21}Ne/^{22}Ne-$ $^{20}Ne/^{22}Ne$ 图。

图例同图 6-2（据文献[245]改编）。

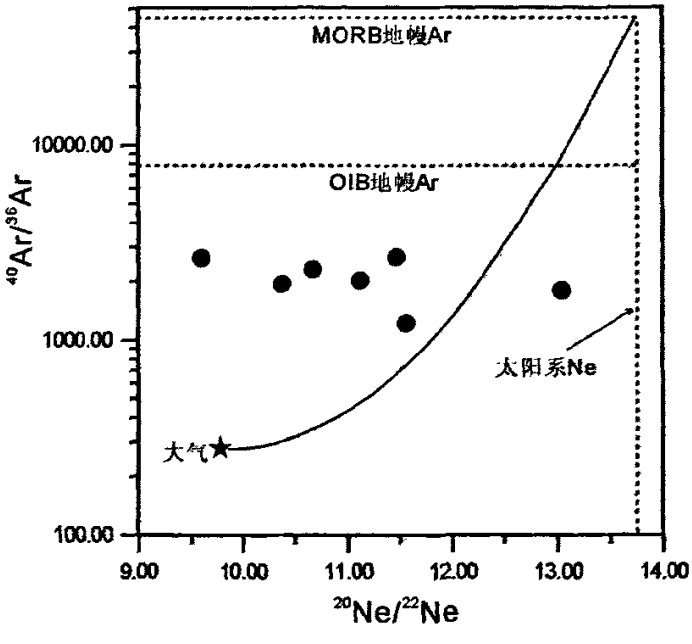


图 6-6 大坪白钨矿 $^{40}Ar/^{36}Ar-$ $^{20}Ne/^{22}Ne$ 图。

图例同图 6-2（据文献[245]改编）。

6.2.2.3.3 Xe 同位素体系

前人研究还显示：不同来源的 Xe 同位素组成有较大的区别：地壳 Xe 的 $^{129}Xe/^{130}Xe$ 变化很小，而 $^{134}Xe/^{130}Xe$ 变化很大，因此在 $^{129}Xe/^{130}Xe$—$^{134}Xe/^{130}Xe$ 图上近乎一条垂直线(图 6-7)，而地幔 Xe 的 ^{129}Xe 高于地壳，^{134}Xe 低于地壳，故 $^{129}Xe/^{130}Xe$ 和 $^{134}Xe/^{130}Xe$ 之间呈现正相关关系[246]. 图 6-7 可见，大坪白钨矿除个别点落在地壳演化线上外，多数样品落在地幔 Xe 演化线上，显示大坪白钨矿成矿流体中存在较多的地幔 Xe。

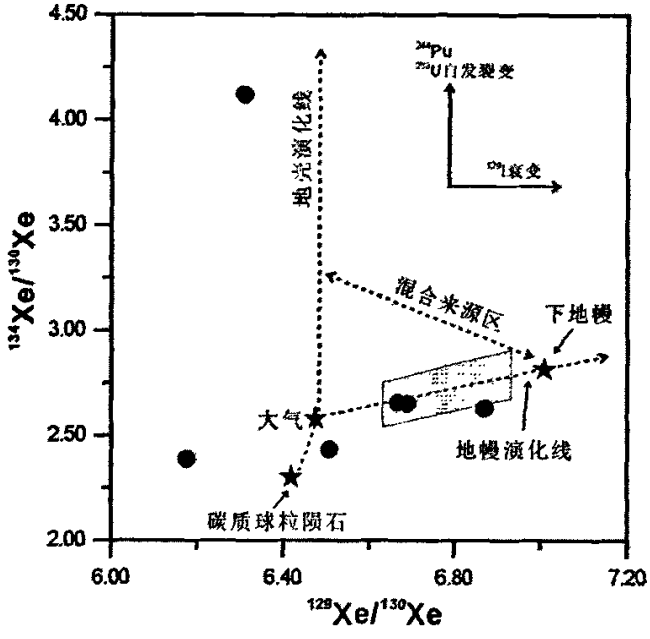


图 6-7 大坪白钨矿 $^{129}Xe/^{130}Xe$—$^{134}Xe/^{130}Xe$ 图。
图例同图 6-2。(据文献[245]改编)。

^{134}Xe 和 ^{136}Xe 主要由 ^{244}Pu 和 ^{238}U 放射性裂变形成，且由于 ^{244}Pu 的半衰期只有 82Ma [204]，因此地质不同源区 ^{134}Xe 和 ^{136}Xe 的组成主要受到 ^{238}U 的控制，而 ^{130}Xe 为非放射性成因的，故地质体中，特别是地壳物质的 $^{134}Xe/^{130}Xe$ 随地质时代的变新而升高(图 6-8)。已知大坪金矿成矿年龄约为 50Ma [24]，图 6-8 上可见大坪白钨矿除一个样品外，主要落在地幔和下地壳范围内。图 6-9 显示：大坪白钨矿投点均偏移大气 Xe 和地幔 Xe 混合线的范围，其 $^{136}Xe/^{130}Xe$ 较高，也说明了大坪金矿成矿流体不是地幔流体和大气饱和水的混合流体，其中有富 ^{136}Xe 或贫 ^{130}Xe 流体的参与，而最大的可能是地壳流体的加入。

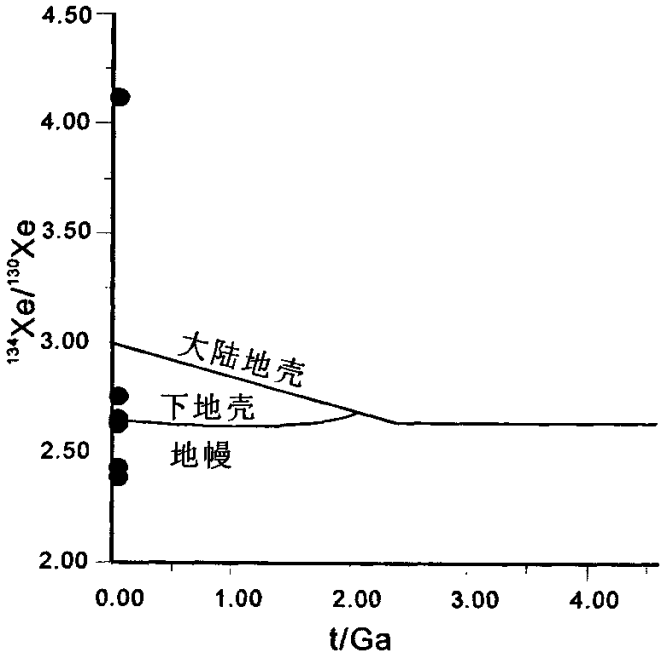


图 6-8 地球不同地质体 $^{134}Xe/^{130}Xe$ 随地质时代（t）的演化线。
图例同图 6-2(据文献[245]改编)。

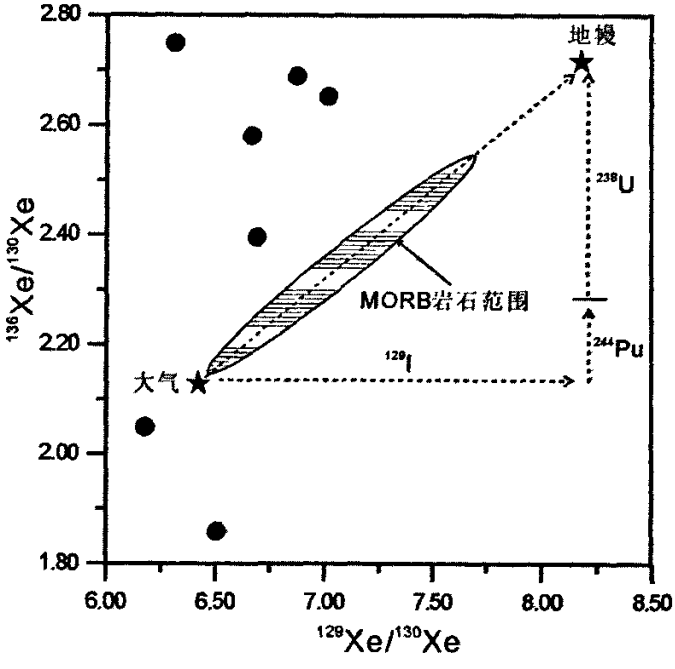


图 6-9 大坪白钨矿 $^{129}Xe/^{130}Xe-^{136}Xe/^{130}Xe$ 图。
图例同图 6-2（据［249］改编）。