

居留时间

$$\tau^i = \frac{MC^i(\infty)}{QMC^i(\infty) + PC_{sed}^i(\infty)}$$

元素服从指数分布，时间 θ 残留概率

$$f(\theta) = e^{-\theta/\tau}$$

比值型的数据，要保证 $(B1/D1) = (B2/D2)$ ，

混合线才为线性

$$晶格应变 D_M^{D_i/I} = exp(-4\pi EN_A \frac{r_0}{2} (r_m - r_0)^2 + \frac{1}{3}(r_m - r_0)^3) / RT)$$

封闭温度(Dodson)

$$T_c = (E/R) / \ln(ART_0^2 D_0 / a^2) / (E dT / dt)$$

批式熔融 $C_i/C_i(0) = 1/(F+D(1-F))$

$(CA/CB)_{melt} / (CA/CB)_{source} =$

$$(F+DB(1-F)) / (F+DA(1-F))$$

瑞利式 $C_s = C_0(1-F)^{D-1}$

$$C_s/C_0 = (1-F)^{D-1}$$

$$C_i/C_0 = 1/D * (1-F)^{D-1}$$

岩浆平衡结晶 $C_i^l/C_i^0 = 1/(DX + (1-X))$

分离结晶 $C_i^l/C_i^0 = F^D(D-1)$

$$\delta^{18}O_{SMOW}$$

$$= \frac{(^{18}O/^{16}O)_{sam} - (^{18}O/^{16}O)_{SMOW}}{(^{18}O/^{16}O)_{SMOW}} * 1000$$

$$\delta_A = (R_A/R_B - 1) * 1000$$

同位素分馏值 $\Delta_{A-B} = \delta_A - \delta_B$

分馏系数 $\alpha_{A-B} = R_A/R_B$

$= (\delta_A + 1000) / (\delta_B + 1000)$ 约等于 1

$$1000 \ln \alpha_{A-B} = 1000(\alpha_{A-B} - 1) = \Delta_{A-B}$$

$$= \delta_A - \delta_B$$

标准转换 $\delta_{X-A} = [(\delta_{B-A}/1000 + 1)(\delta_{B-A}/$

$$1000 + 1) - 1] * 1000$$

同位素分馏反应平衡常数 $K = \alpha$ 分馏系数

零点能 $E = E_{电子} + E_{平动} + E_{转动} + E_{振动}$ $E_{振动} = (n+1/2)h\nu$

$$v = 1/2\pi(K/\mu)^{1/2} / K$$
 为结合力常数

降水过程中：残余分数为 f 时

残余的云的氧同位素组成为 $\delta^{18}O_V =$

$$(1000 + \delta^{18}O_0) * F^{\alpha-1} - 1000$$

降雨的瞬时氧同位素组成为 $\delta^{18}O_L =$

$$(1000 + \delta^{18}O_0) * \alpha * F^{\alpha-1} - 1000$$

降雨的平均氧同位素组成为

$$\delta^{18}O_L$$

$$= (1000 + \delta^{18}O_0) * (F^{\alpha} - 1) / (F - 1)$$

$$- 1000$$

理论斜率 $(\alpha^D - 1) / (\alpha^0 - 1)$

衰变 $t = 1/\lambda * \ln[(D-D_0)/P+1] = 1/\lambda$

$$* \ln(D^*/P+1)$$

等时线: $(D/D^*)^m = (D/D^*)_0 + (P/D^*)^m (e^{\lambda t} - 1)$

Pb-Pb 等时线 $(206Pb/204Pb)_m^* = 137.88 \times$

$$(207Pb/204Pb)_m^* \times (e^{\lambda 238U t} - 1) / (e^{\lambda 235U t}$$

$$- 1)$$
 注意样品还是不是 137.88

阿伦尼乌斯方程 $\ln k = \ln A - E/(RT)$

活度 $(238U) = [238U]^* \lambda 238U$

铀系不平衡: 母子放射性活度比不为 1

$$(238U)/(230Th) > 1, 238U 过剩$$

$$(238U)/(230Th) < 1, 230Th 过剩$$

常见的母子对: 238U-230Th, 230Th-226Ra,

235U-231Pa

变温反应 $k = k_0 \exp(-t/\tau)$

fick 第一 $J = -D \partial C / \partial x$ 第二 $\partial C / \partial t =$

$$D \partial (\partial C / \partial x) / \partial x$$

扩散距离 $C = a \cdot \text{erf}(X/(4Dt)^{1/2}) + b$

特征扩散距离: X_c 正比于根号 (Dt) 常数可以

取 0.953872

中分浓度距离: 在扩散曲线最高和最低浓度的

中间值的距离

$$半无限 $C = (C_0 - C_{\infty}) \text{erf}(X/(4Dt)^{1/2}) + C_0,$$$

$$C_0 = b, C_{\infty} = a + b$$

无限介质 $C = (C_{左} + C_{右})/2 + (C_{右} - C_{左})$

$$\text{erf}(X/(4Dt)^{1/2})/2$$

碳酸盐碱度 $\text{Alk} = [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] + [\text{HCO}_3^-] +$

$$2[\text{CO}_3^{2-}]$$

离子势 = 价态/离子半径

$\text{pe}0(\text{标准}) = \log K$ 类似于 pH, pe 是一个概念,

表征体系中自由电子的浓度, pe 越低,

体系越还原, 反应偏向右边。

pe 和半反应电势 Eh 的关系 $\text{pe} = 16.9 \text{Eh}$

逸度的定义: $G = RT \ln f$

冰期间冰期 两万年 四万年 十万年

历史上两次大大氧化 24 亿年前和 8 亿年前

黑烟囱中的矿物 铜、锌、铁、铅硫化物、重

晶石、硬石膏、铁氧化物、非晶质二氧化硅、

碳酸盐组成

水 - 岩 交 换 作 用

$$W \times \delta^{18}O_W^i + R \times \delta^{18}O_R^i = W \times \delta^{18}O_W^f + R \times \delta^{18}O_R^f$$

TTG: Tonalite-trondhjemite-granodiorite (英

云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩), 来自

含水的基性地壳的高压熔融, 例如蚀变的洋

壳, 具有高 Na/K 和高 Sr/Y。

陆壳的平均成分是安山质, 大陆岛弧发育了

大量安山岩, 研究安山岩就是研究陆壳形成。

虽然陆壳平均成分是安山质的, 并不能说明

陆壳完全是从安山岩演化来的, 下地壳和上

地壳具有显著不同的历史。

陆壳演化-风化作用 拆沉作用 底垫作用

重熔作用

核合成类型 太初核合成、恒星核合成、爆炸

核合成、宇宙射线散裂

氢的燃烧: 质子-质子链、CNO 循环

R 过程加上 β -衰变产生富中子的同位素; S

过程较慢, 反映了中子在捕获和 β -衰变之间

的平衡; P 过程产生位于稳定谷上方的富质

子的原子核

短寿命同位素的意义

26Al-26Mg: 高温矿物从太阳系星云中凝结

时 Al/Mg 的分异。

182Hf-182W: 亲铁元素和亲石元素的分异,

铁核形成的时间。

53Mn-53Cr: 行星物质的核幔分异。

146Sm-142Nd: Sm-Nd 的早期分异, 例如壳幔

分异。早太古代的地壳样品中存在少量的

142Nd 过剩, 说明可能来自早期 Nd 亏损地幔。

129I-129Xe: 最早得到测量的短寿命同位素

体系, MORB 的 129Xe/130Xe 比大气高 地

幔曾经的 129I/130Xe 高 地幔在 129I 还存在

时发生过去气过程。

60Fe-60Ni: 60Fe 是唯一的确定来自超新星的

核素, 因此可以研究恒星物质如何加入的新

生太阳系中。

计算行星深部压力 $p = \rho \int_0^h g(h) dh =$

$$\rho \int_0^h \frac{4}{3} \pi G (r-h) dh = \frac{2}{3} \pi G \rho^2 h (2r-h)$$

$$\epsilon_{Hf}(t)$$

$$= \left(\frac{(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s * (e^{\lambda t} - 1)}{(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} * (e^{\lambda t} - 1)} - 1 \right) * 10000$$

	沉淀>溶解	沉淀<溶解
扩散不起作用	同位素和元素平衡	矿表面有动力学同位素分馏
扩散起作用	矿表面平衡, 总体和溶液不平衡	矿物表面同位素生长的同位素分馏

十五个造岩矿物:

1. 石英 quartz SiO_2
2. 白云石 dolomite $CaMg(CO_3)_2$
3. 方解石 calcite $CaCO_3$
4. 长石 斜长石 碱性长石 架 feldspar
plagioclase $Na[AlSi_3O_8] - Ca[Al_2Si_2O_8]$
alkali feldspar $Na[AlSi_3O_8]-K[AlSi_3O_8]$
5. 辉石 链 pyroxene $XY(Si,Al)_2O_6$ 顽
火辉石 enstatite $X,Y=Mg$
6. 角闪石 链状 hornblende
 $A_{0-1}B_2C_5T_8O_{22}(OH,F,Cl)_2$
7. 橄榄石 岛 olivine $(Mg,Fe)_2SiO_4$ 镁
橄榄石 forsterite 铁橄 fayalite
8. 云母 层 mica $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$
9. 黑 云 母 层 biotite
 $K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(F,OH)_2$
10. 高岭石层 kaolinite $Al[Si_4O_{10}](OH)_8$
11. 绿 泥 石 层 状 chlorite
 $Y[Z_4O_{10}](OH)_2 \cdot Y_3(OH)_6$
12. 赤铁矿 hematite Fe_2O_3
13. 石膏 gypsum $CaSO_4 \cdot H_2O$
14. 磁铁矿 magnetite Fe_3O_4
15. 孔雀石 malachite $Cu_2(OH)_2CO_3$
16. 尖晶石 spinel $MgAl_2O_4$

十种岩石

1. 泥岩 mudstone
2. 页岩 shale
3. 大理岩 marble
4. 灰岩 limestone
5. 花岗岩 granite
6. 砾岩 conglomerate
7. 砂岩 sandstone
8. 粉砂岩 siltstone
9. 糜棱岩 mylonite
10. 安山岩 andesite
11. 砾卡岩 skarn
12. 白云岩 aolomite
13. 片麻岩 gneiss
14. 橄榄岩 peridotite
15. 流纹岩 rhyolite
16. 榴辉岩 eclogite

重要的地球化学端元

上地壳: 高放射成因 Pb-Sr, 低 $^{143}Nd/^{144}Nd$,
高硅低镁

古老下地壳: 低放射成因 Pb-Sr, 低
 $^{143}Nd/^{144}Nd$

年轻下地壳: 类似于幔源岩浆岩

洋底沉积物: 类似于上地壳, 高 ^{18}O

俯冲洋壳: 包括沉积物、含水流体和蚀变洋
壳, 放射成因同位素约等于大洋沉积物, 微
量元素约等于陆壳

亏损地幔: 低放射成因 Pb-Sr, 高
 $^{143}Nd/^{144}Nd$

富集地幔端元 I 和 II: 高 $^{87}Sr/^{86}Sr$, 低
 $^{143}Nd/^{144}Nd$, Pb 同位素不同

HIMU: 历史上高 U/Pb, 高 $^{206}Pb/^{204}Pb$, 低
 $^{87}Sr/^{86}Sr$

岩浆演化时的元素变化

FeO 和 CaO 先升高, 后下降

MgO 快速下降

Al_2O_3 缓慢下降

Na_2O 和 K_2O 缓慢升高

问题: 什么矿物分离结晶可以造成这些趋
势?

$OI+opx+plg \rightarrow mgt+cpx+plg \rightarrow mgt+cpx+plg$

三角图 AFM

拉斑玄武系列: MgO 快速降低, FeO 先升高
后降低, Alkali 先缓慢升高后快速升高。

钙碱性系列: FeO 和 MgO 一起降低, alkali
快速升高

拉斑玄武系列: 玄武岩-富铁玄武岩-富碱岩石,
含有 cpx 和 plg, 少量 Fe-Ti 氧化物, opx 和
易变辉石也可能出现, 橄榄石可能由贫 Ca
的辉石边, 例如 MORB 和月球玄武岩。

钙碱性系列: 玄武岩-玄武质安山岩-安山岩-
英安岩-流纹岩, 岩浆冷却时, 由于氧逸度较
高, 磁铁矿和镁铁矿物一起结晶, 使得岩浆
成分向富碱移动, 但是 Fe/Mg 比值相对稳定。
石油的形成

深成作用阶段, 地温为 $50-200^{\circ}C$, 深度约为
 $1-4km$, 微生物已经不重要。 $60-125^{\circ}C$ 时,
干酪根受热, 裂解形成大量 $C_{15}-C_{40}$ 的烷烃,
此为“生油窗”阶段; $125-200^{\circ}C$ 时, 干酪根和
重烃继续裂解, 形成大量轻烃 (C_1-C_8)

太阳系元素丰度的特征

H、He 占到了全部原子数的 98%; 随着原子
序数的增大, 元素丰度大约指数下降, 序
数 >45 时变化不明显; $Li \setminus Be \setminus B$ 丰度低, $O \setminus Fe$

丰度偏高; 质量数为四的倍数的核素丰度高,
原子序数或中子数满足幻数 (8、20、28、50、
82、126) 丰度大

地球元素丰度的特征 奇偶性、指数衰减

地幔的范围: 莫霍面到核幔边界。

岩石圈: 岩石圈地幔+地壳。

岩石圈地幔: 软流圈和地壳之间刚性的地幔。

软流圈地幔: 过渡带以上, 可以塑性流动的地
幔。

过渡带: $410km - 660km$ 两个不连续面之间
的部分。

下地幔: 过渡带到核幔边界。

D'层: 核幔边界上 $\sim 200km$ 厚的部分

重要的地幔矿物 $10GPa$ 时, 斜方辉石消失,
约 $16GPa$ 时, 单斜辉石消失, 石榴子石和超

硅石榴子石 (majorite) 出现。橄榄石在 $410km$
发生相变, 生成 wads, 后者在 $520km$ 相变
生成 ringwoodite。这两个反应产生了全球范
围的地震不连续面, 地震波波速发生突变。

Ringwoodite 在 $660km$ 变成方镁石和 Mg 钙
钛矿, majorite 也消失

温度梯度 陆壳 $1200^{\circ}C/1000km$ 洋壳 800

MORB 的地质意义: 上地幔的地球化学组成,
地

幔的温度、压力和动力学, 熔融过程。

洋岛玄武岩, 贡献了新生岩浆岩的 10%; 可
以用来研究地幔的地球化学性质, 地球动力
学, 地幔熔融, 地壳再循环

岛弧火山岩占全球新生岩浆岩的 15%。岛弧
玄武岩: 地幔的地球化学性质, 地球动力学

(地幔模的对流), 地幔加水熔融, 地壳再循
环和壳幔相互作用 (俯冲洋壳交代地幔),
陆壳生长, 火山爆发。

溢流玄武岩: 超大规模的玄武岩岩浆喷发的
产物, 覆盖了大面积的

陆地或者海洋。可能来自地幔热柱。地质意
义: 陆壳增生的贡献 (地壳的垂直增生),

地幔熔融, 俯冲物质再循环 (石榴辉岩源区),
地幔的温度演化 (和地幔柱有关系),

生物大灭绝 (恐龙灭绝到底是陨石撞击还是
大规模岩浆喷发), 成矿