



镁同位素示踪表生地质过程 —原理、应用及展望

黄康俊

西北大学地质学系

hkj@nwu.edu.cn



提纲

CONTENTS

01

表生地质过程与全球镁循环

02

表生地质过程镁同位素行为

03

镁同位素示踪表生地质过程

- 雪球地球结束过程
- 东亚季风降水重建

04

展 望



提纲

CONTENTS

01

表生地质过程与全球镁循环

02

表生地质过程镁同位素行为

03

镁同位素示踪表生地质过程

- 雪球地球结束过程
- 东亚季风降水重建

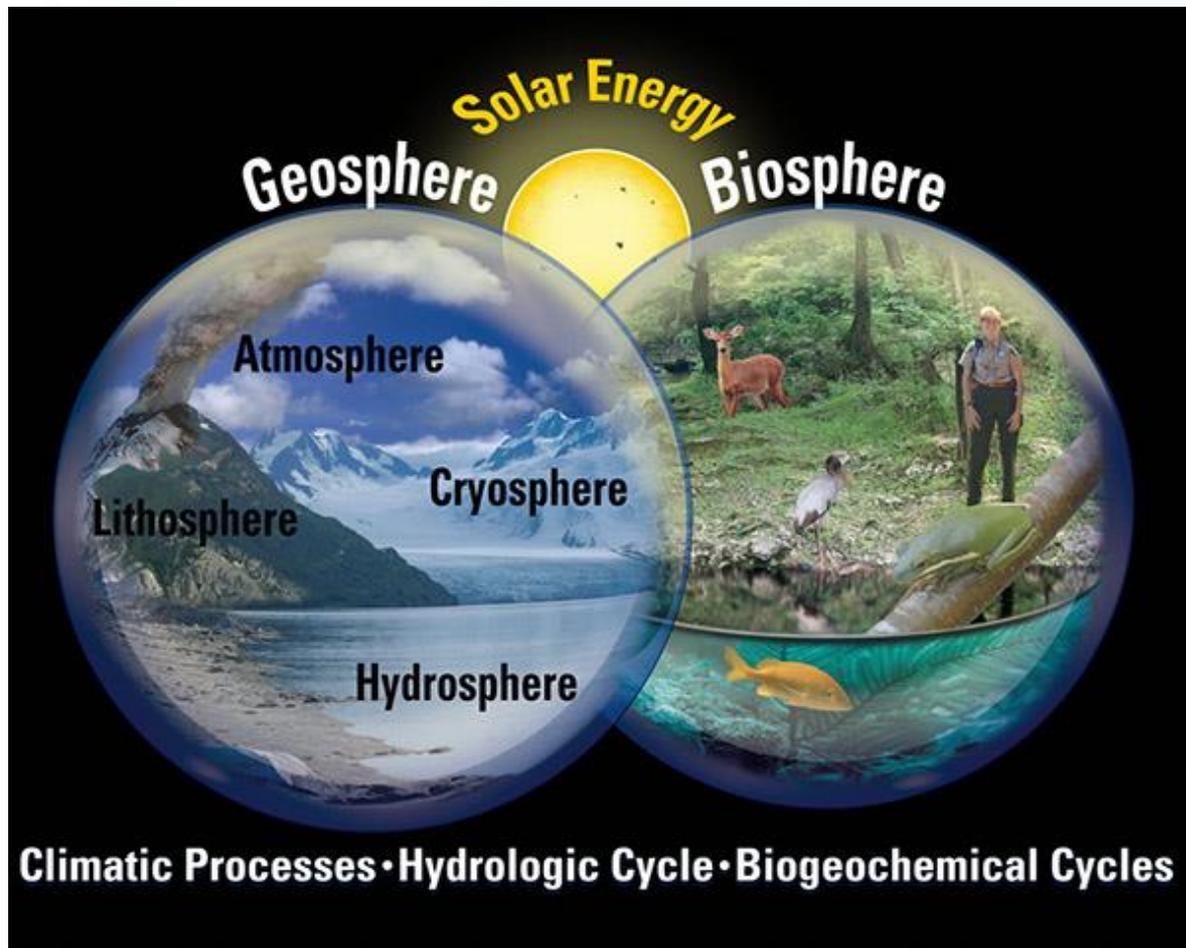
04

展 望

表生地质过程

表生地质过程

- 1 大气圈
- 2 水圈
- 3 岩石圈浅部
- 4 生物圈



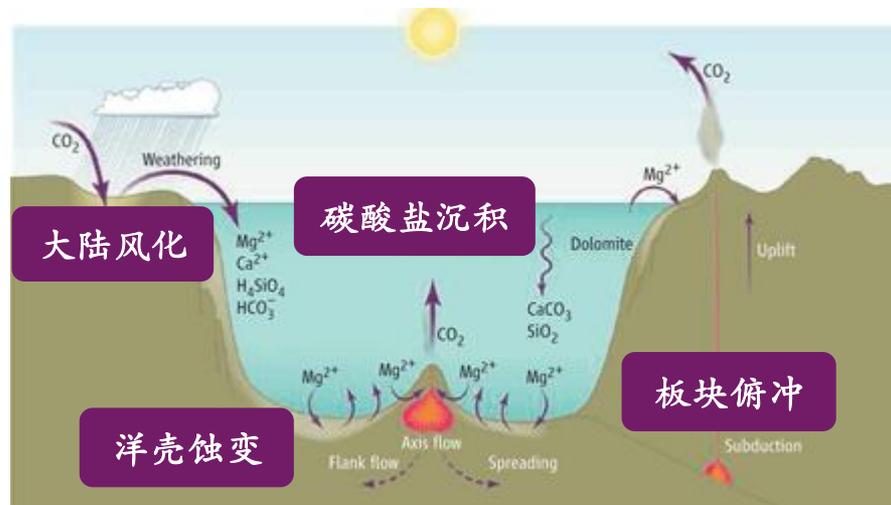
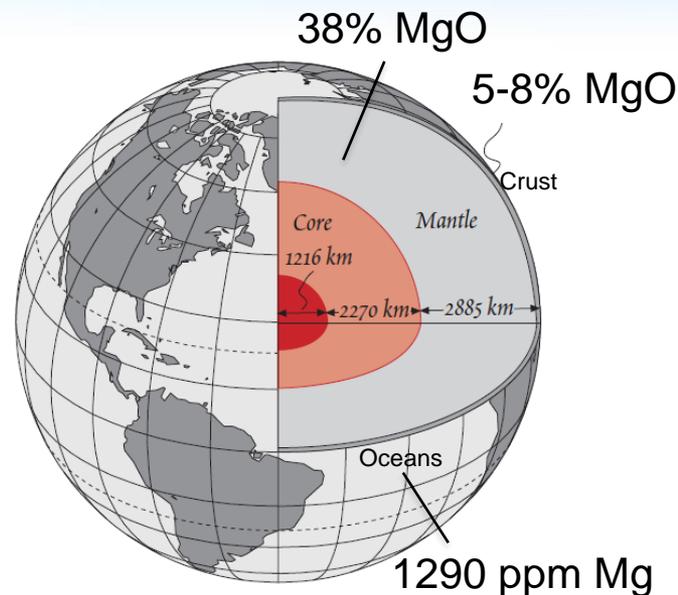
与人类生活密切相关，是地球科学中的基本地质过程之一

表生地质过程中的镁

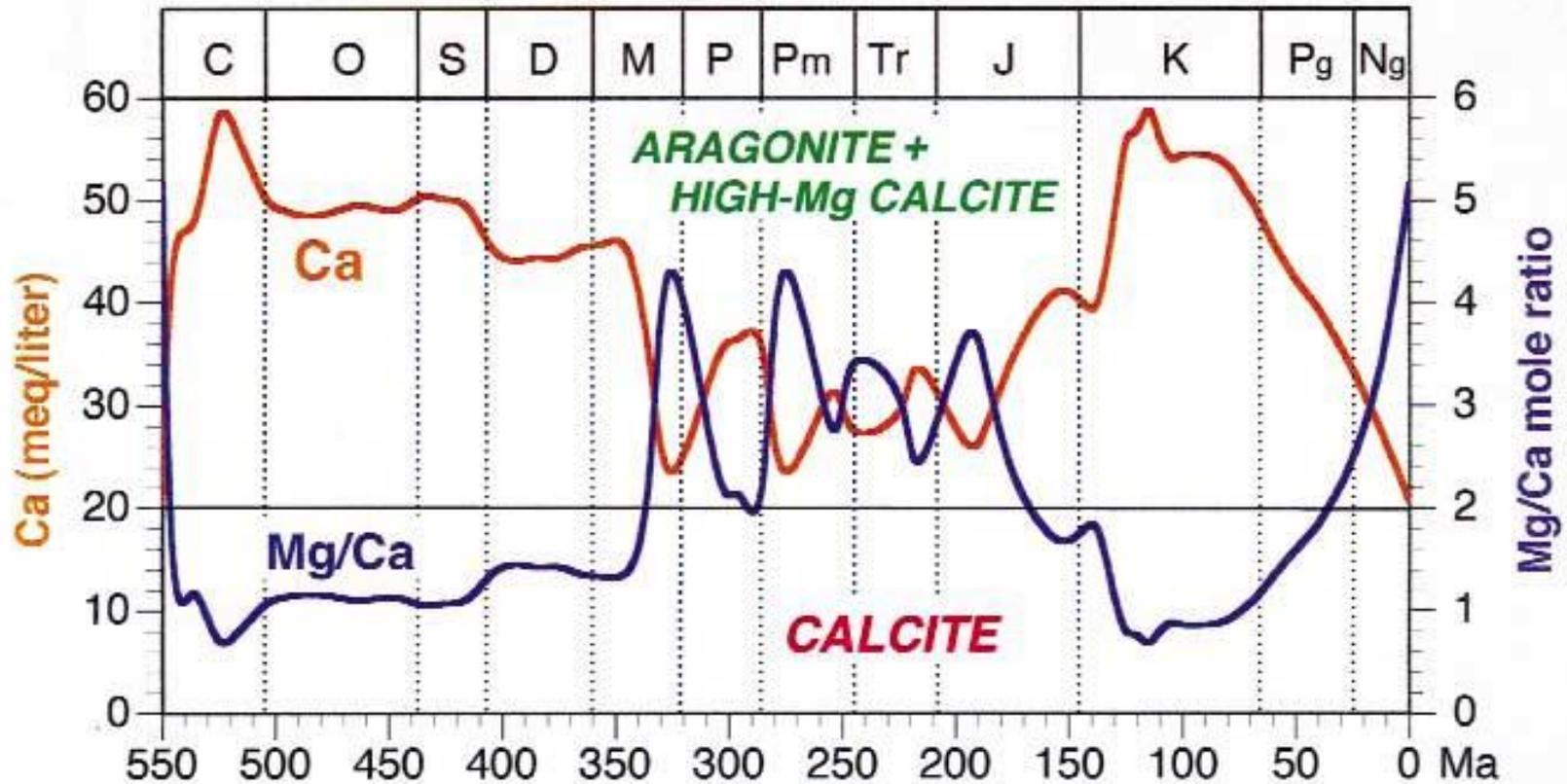
表生地质过程中的镁

1. 各圈层主要组成元素
2. 流体活动性元素
3. 与全球碳循环相关
4. 涉及大陆地壳演化过程

对于理解镁的地球化学循环、全球气候变化以及陆壳的演化都具有重要的科学意义。



全球镁循环与海水化学演化



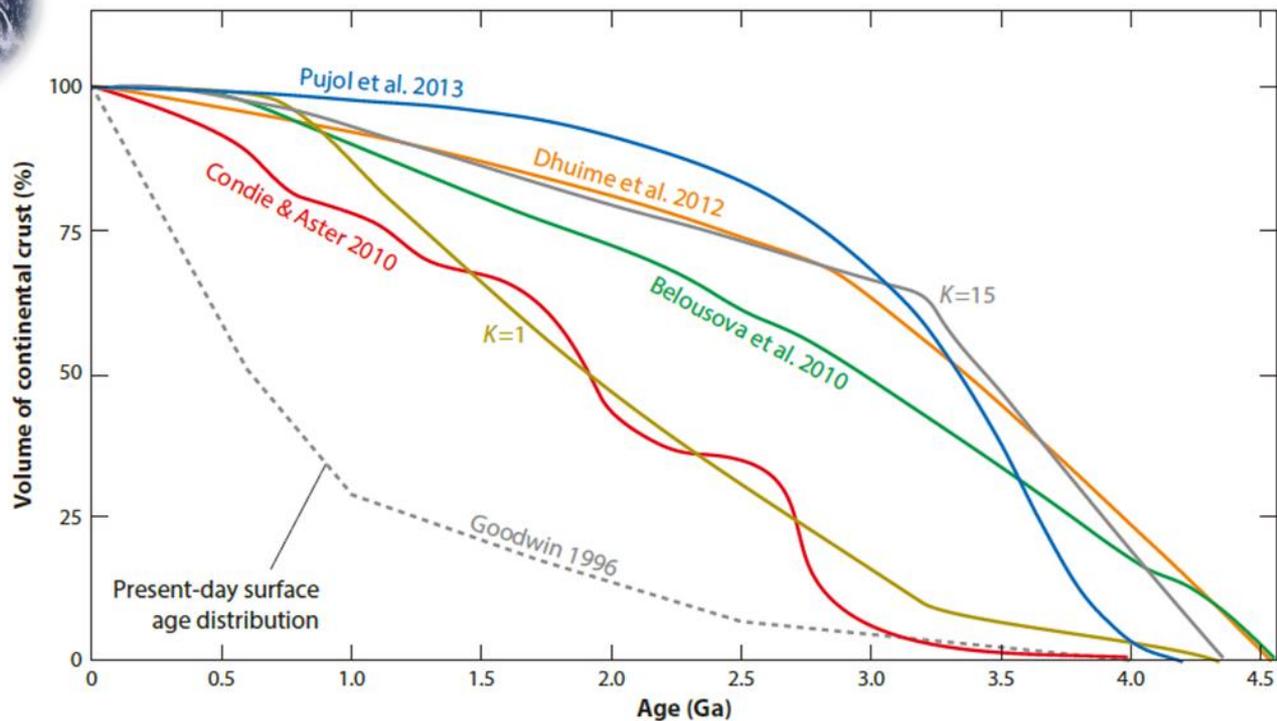
Stanley and Hardie, 1999

海水的Mg/Ca比值变化与大陆风化作用、洋中脊扩张、碳酸盐岩沉积等表生地质过程密切联系

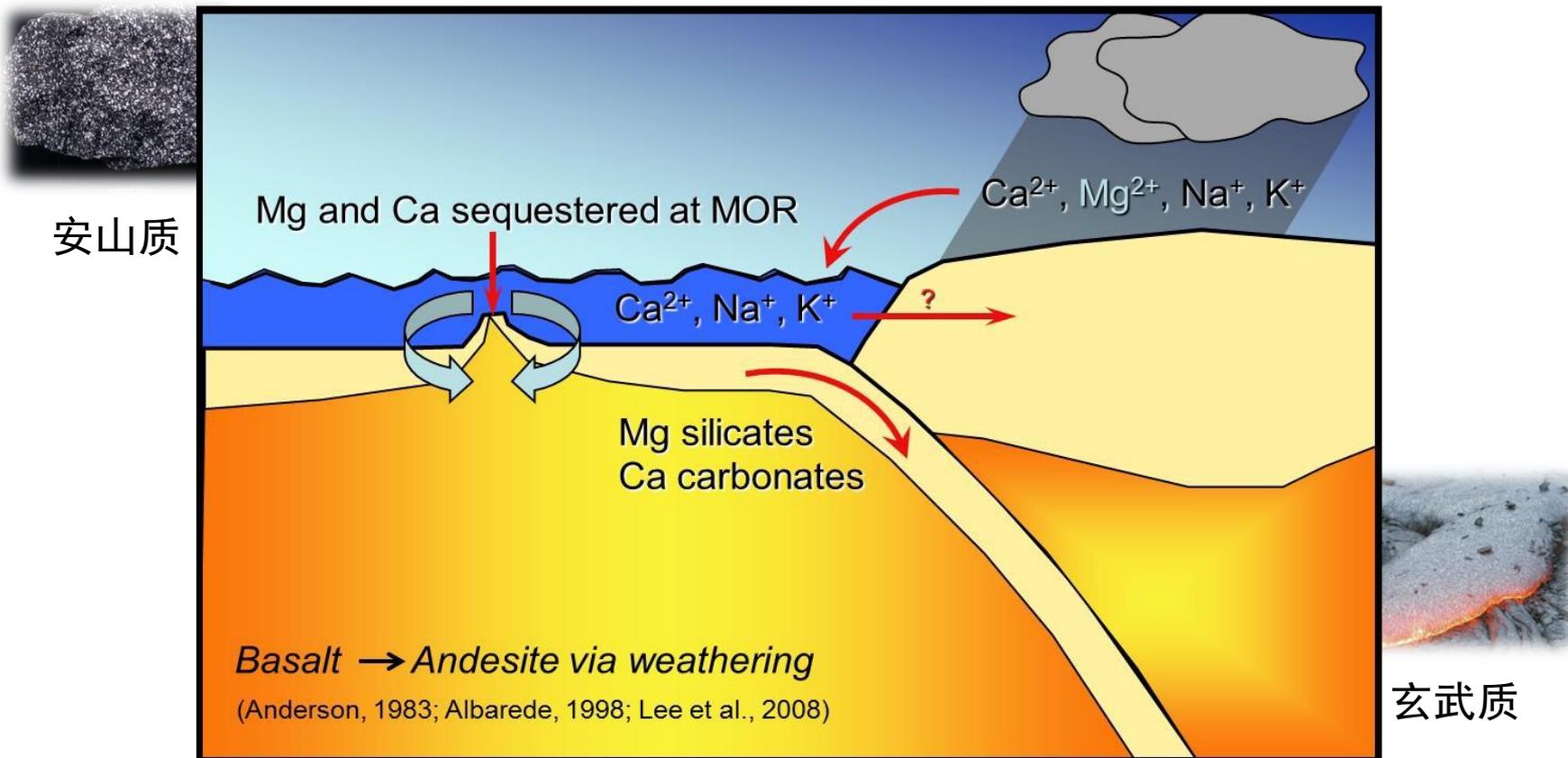
全球镁循环与地球陆壳演化



Hawkesworth et al., 2017

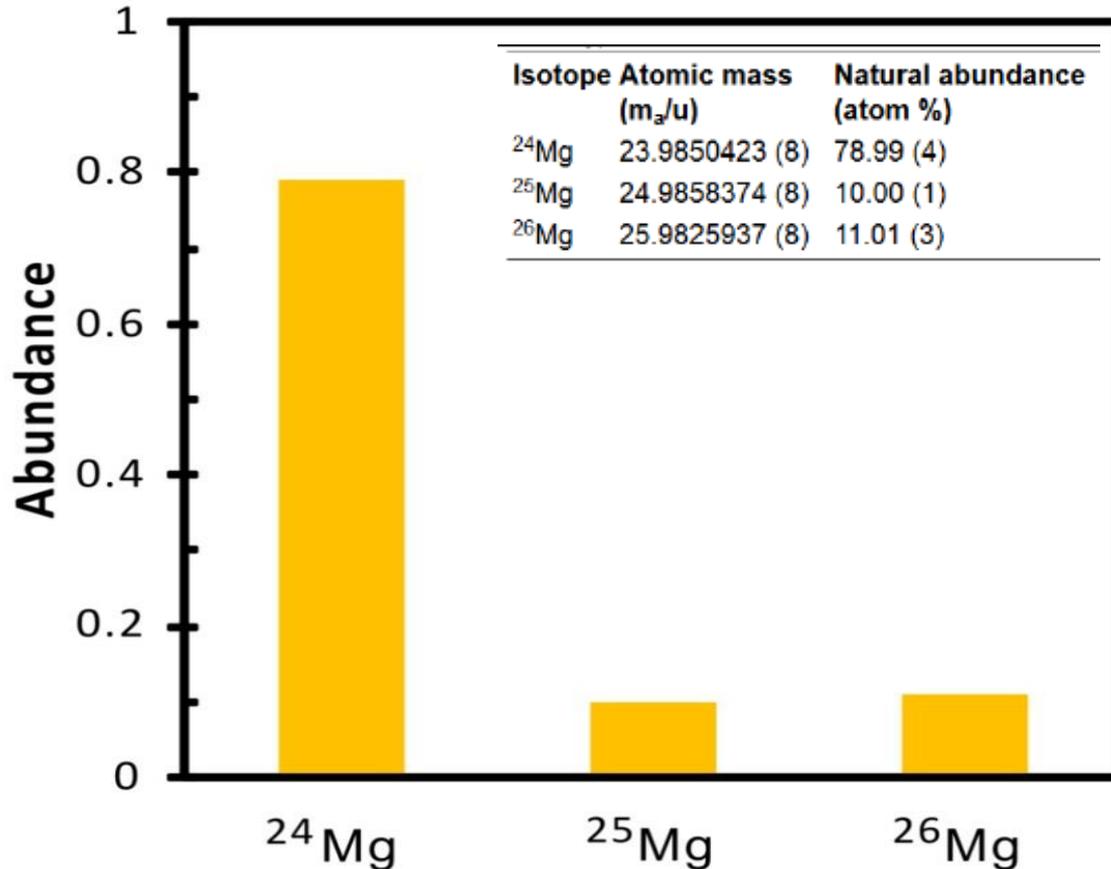


全球镁循环与地球陆壳演化



From Rudnick's slides

镁同位素体系



丰度高 → 测试精度高

质量差大 (>8%) → 较大的质量相关分馏

镁同位素测试分析流程

样品选取

样品溶解

HF-HNO₃-HCl (硅酸岩)
HAc (碳酸盐岩)

离子交换柱纯化

C1: Ca (12N HCl)
C2: Na, Al, Fe (1N HNO₃)

回收率
~100%

MC-ICP-MS 测试

$$\delta^{26}\text{Mg} = 10^3 \times \left(\frac{(^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_{\text{sample}} - (^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_{\text{DSM3}}}{(^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg})_{\text{DSM3}}} \right)$$

镁地球化学储库

陆壳

- MgO = 5 wt. %
- Bt, Hbl, Px

洋壳

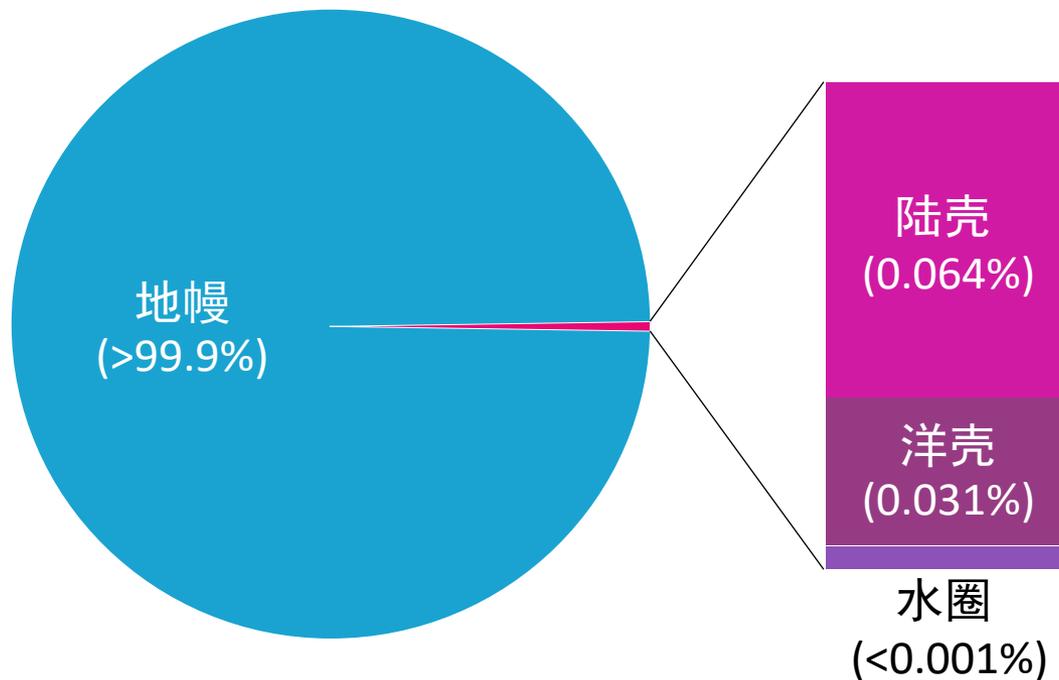
- MgO = 8 wt. %
- Px, Ol

地幔

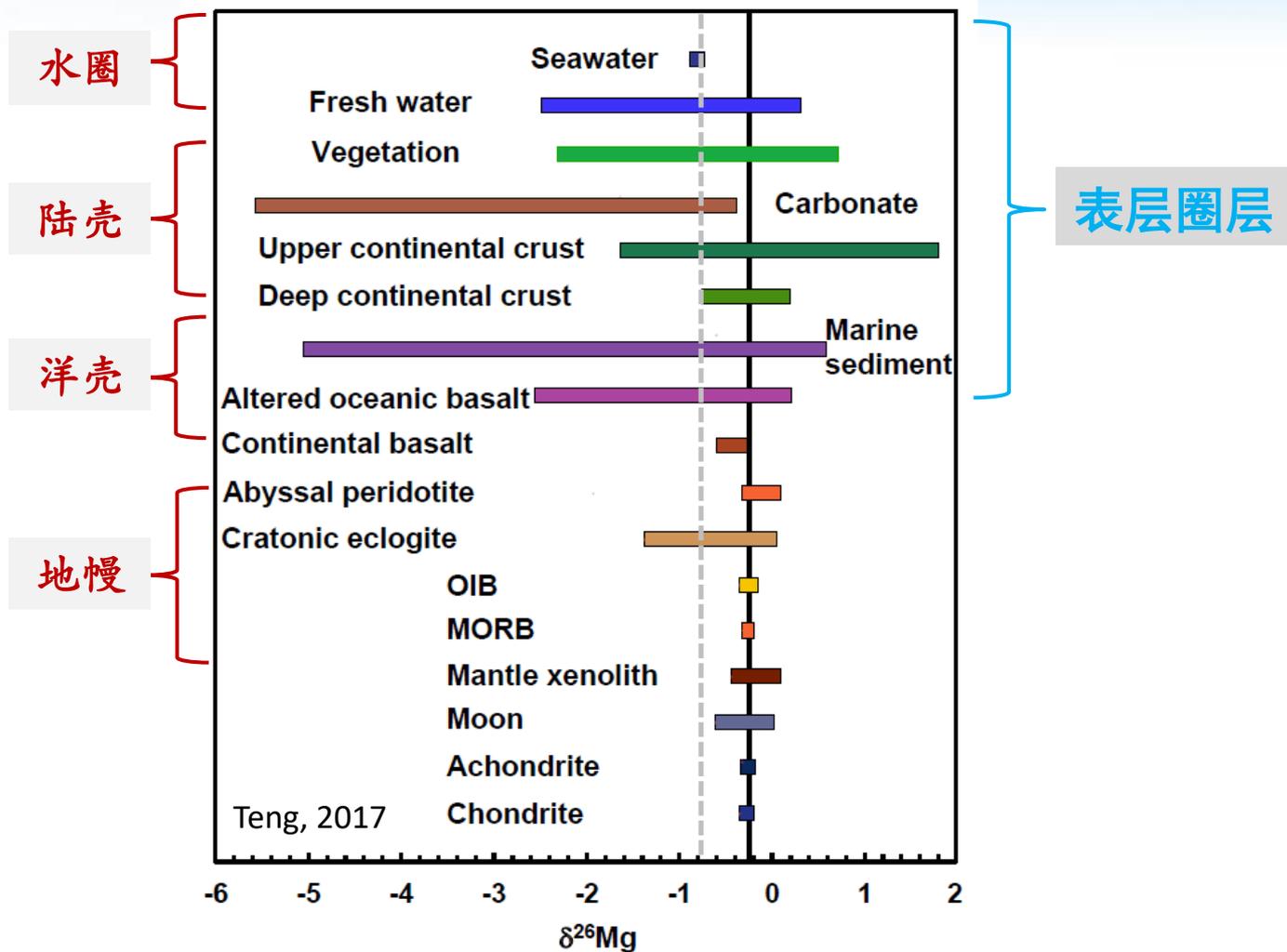
- MgO = 38 wt. %
- Ol, Px

水圈

- 海洋 (~1290 ppm)
- 河流 (< 10 ppm)



地球主要储库镁同位素组成



地球表层圈层镁同位素组成差异明显 ($\delta^{26}\text{Mg} = -5.5 \sim +1.8$)



提纲

CONTENTS

01

表生地质过程与全球镁循环

02

表生地质过程镁同位素行为

03

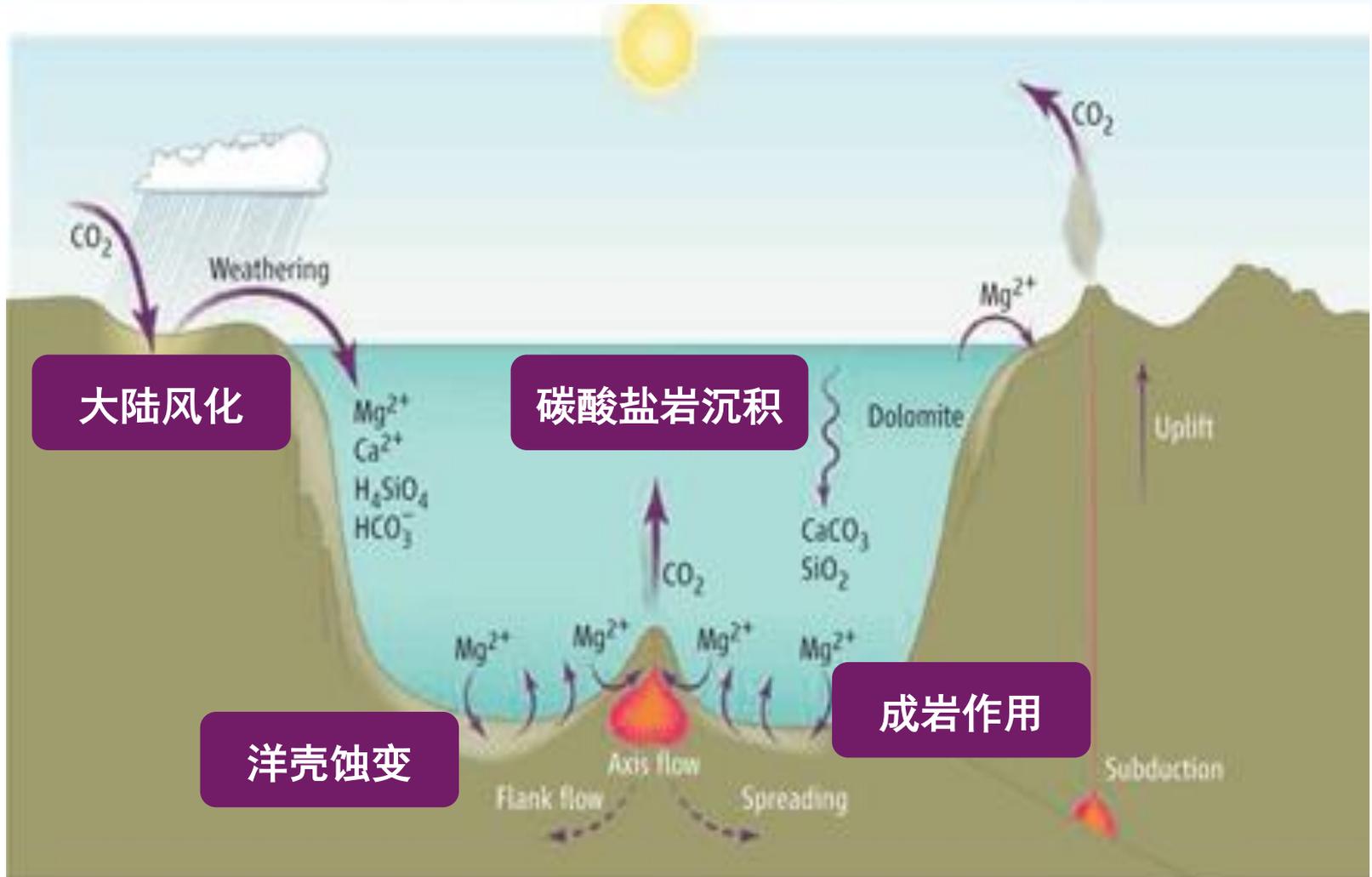
镁同位素示踪表生地质过程

- 雪球地球结束过程
- 东亚季风降水重建

04

展 望

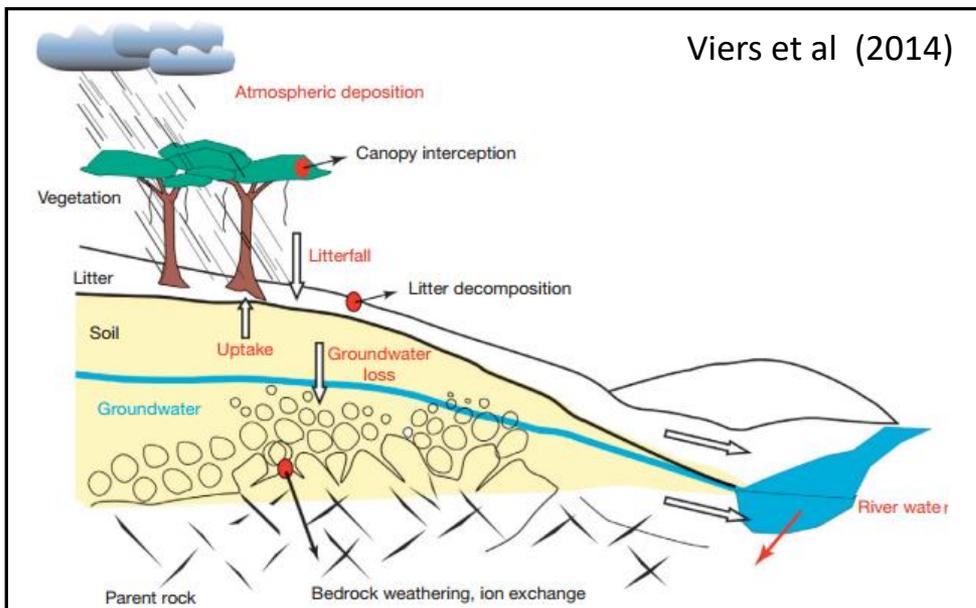
控制全球镁循环的表生地质过程



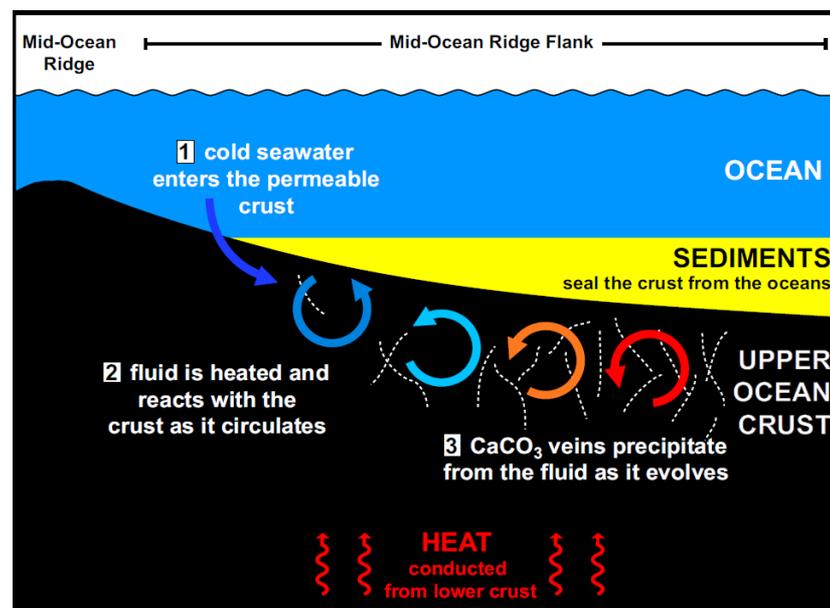
Elderfield, 2010

硅酸盐-水相互作用

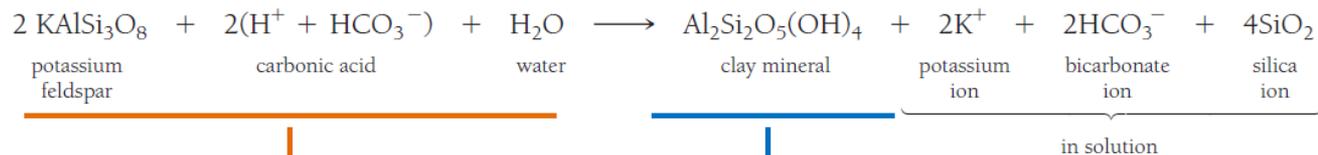
大陆风化作用



洋壳蚀变作用+沉积物成岩作用



Coggon & Teagle, 2011



原生矿物溶解

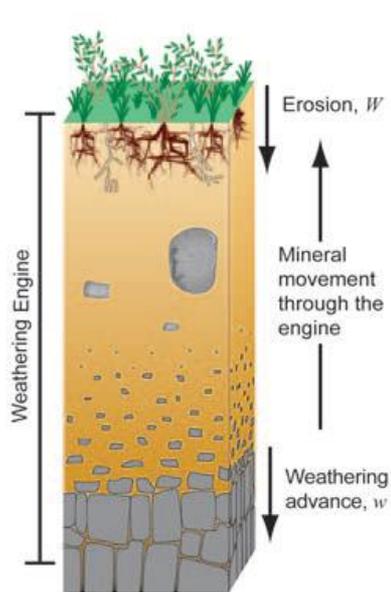
次生矿物形成

大陆风化作用

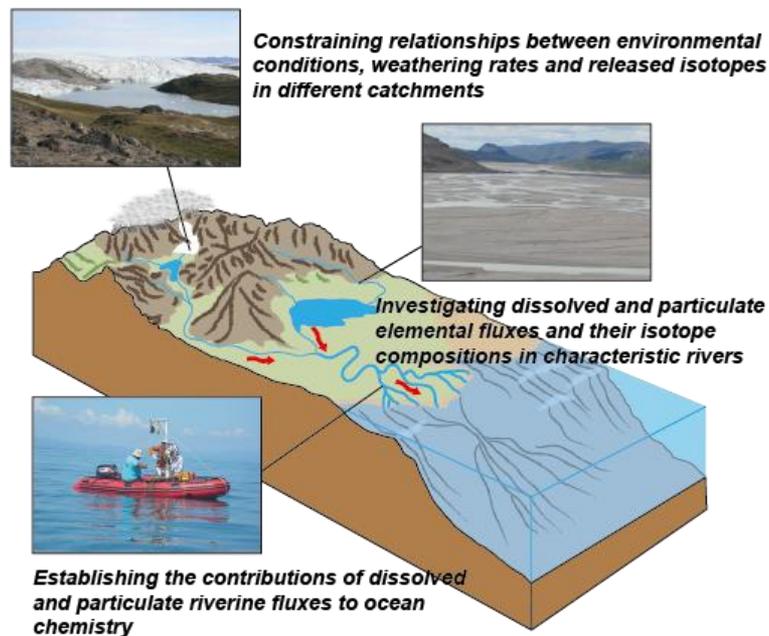
风化剖面



Brantley et al., 2007



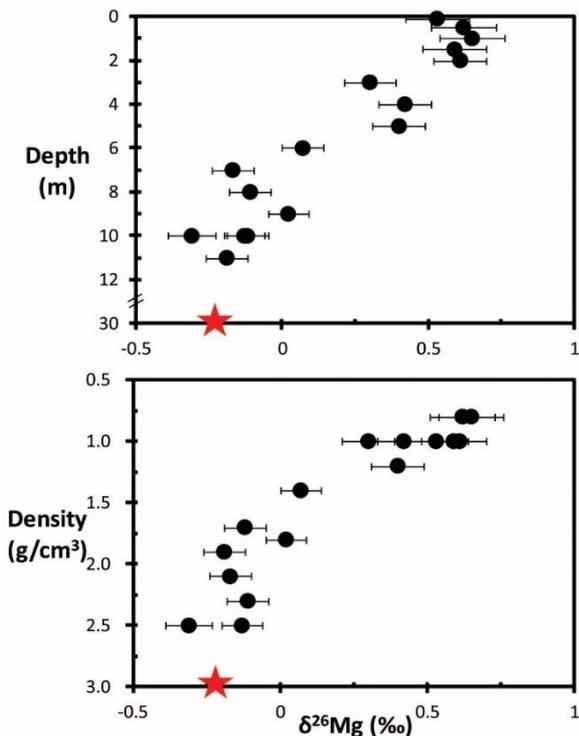
河流



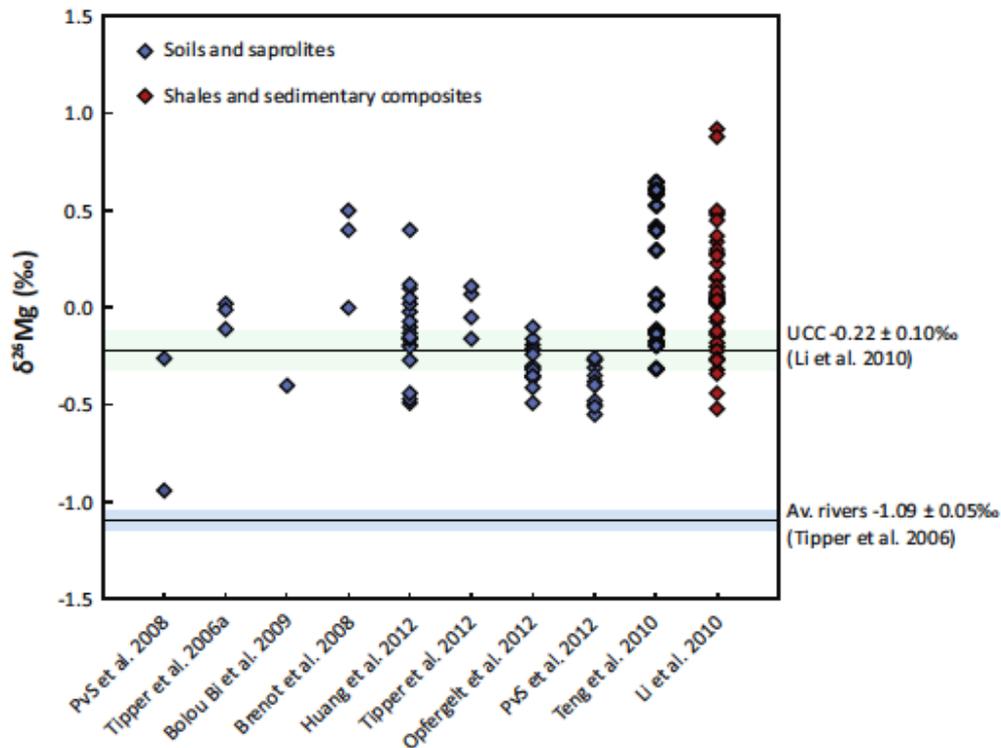
大陆风化过程镁同位素行为

风化强度

Teng et al., 2010



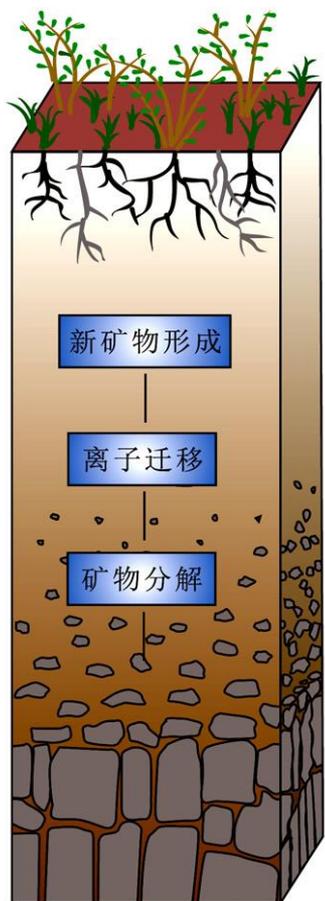
Wimpenny et al., 2014



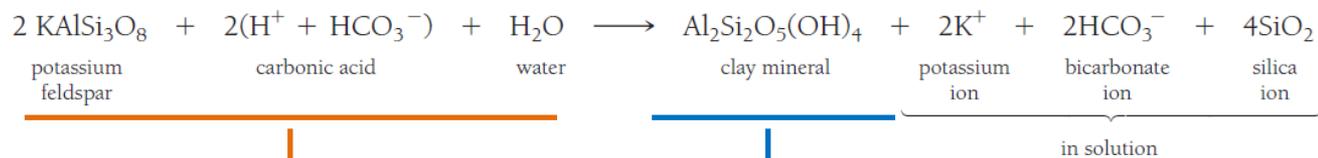
风化残余物富集重镁

河水比风化残余物富集轻镁

大陆风化过程镁同位素行为



剥蚀



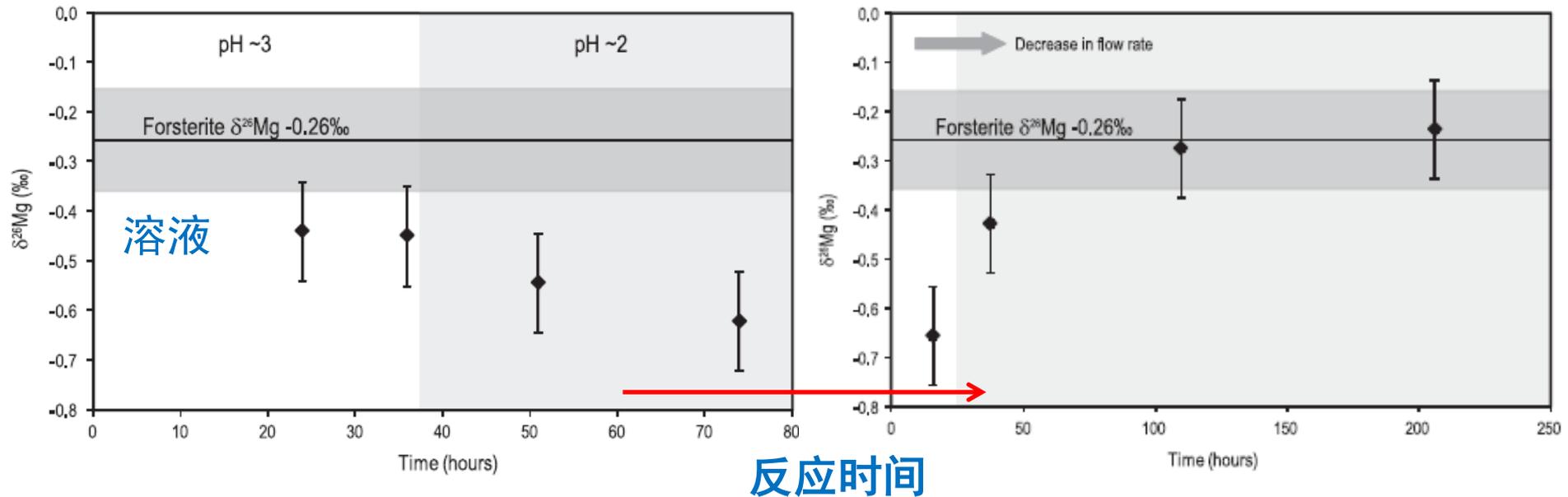
原生矿物溶解

次生矿物形成

方谦等, 2018

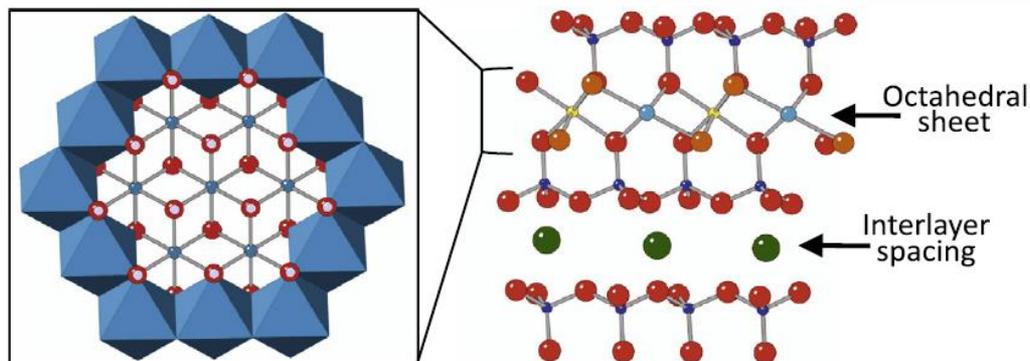
原生矿物溶解过程镁同位素行为

Wimpenny et al., 2010



- 在达到稳态之前，动力学分馏导致 ^{24}Mg 优先释放到流体中
- 稳态溶解时Mg同位素分馏很小

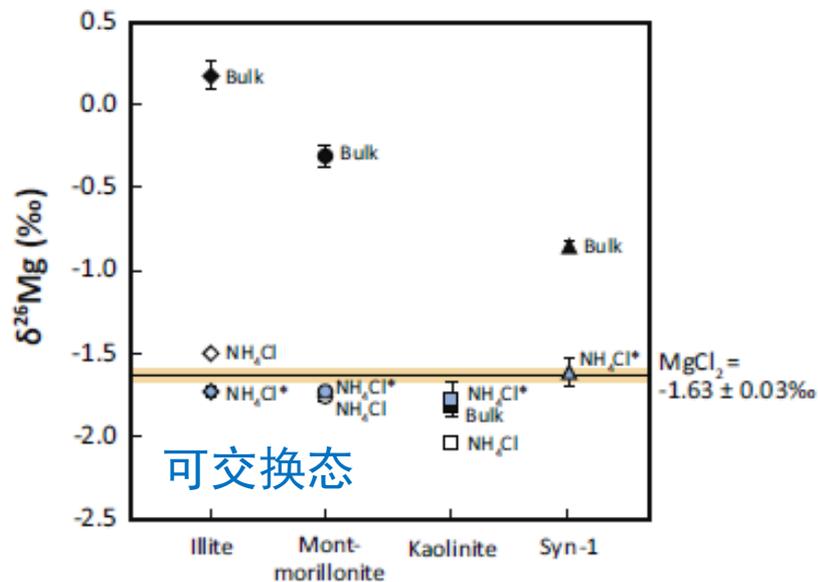
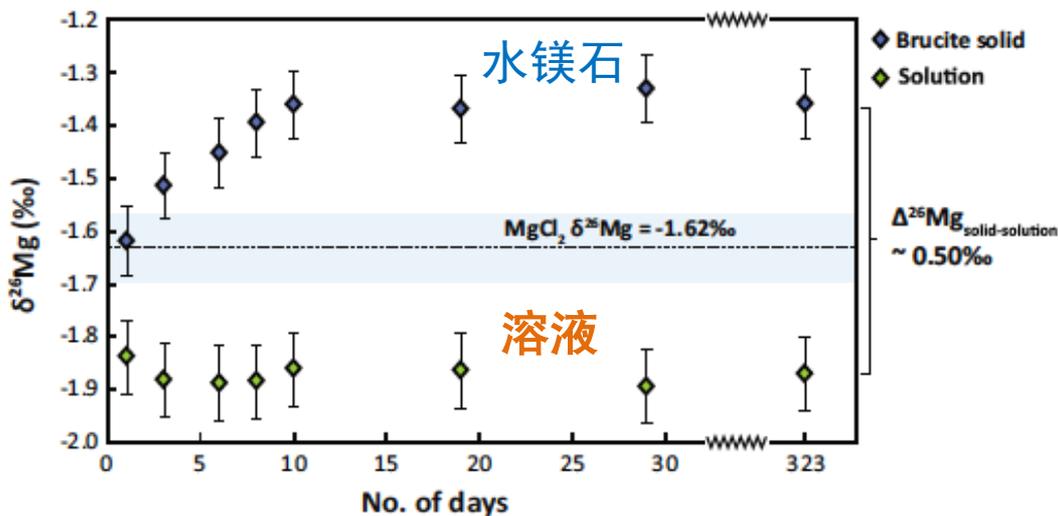
次生矿物形成过程镁同位素行为



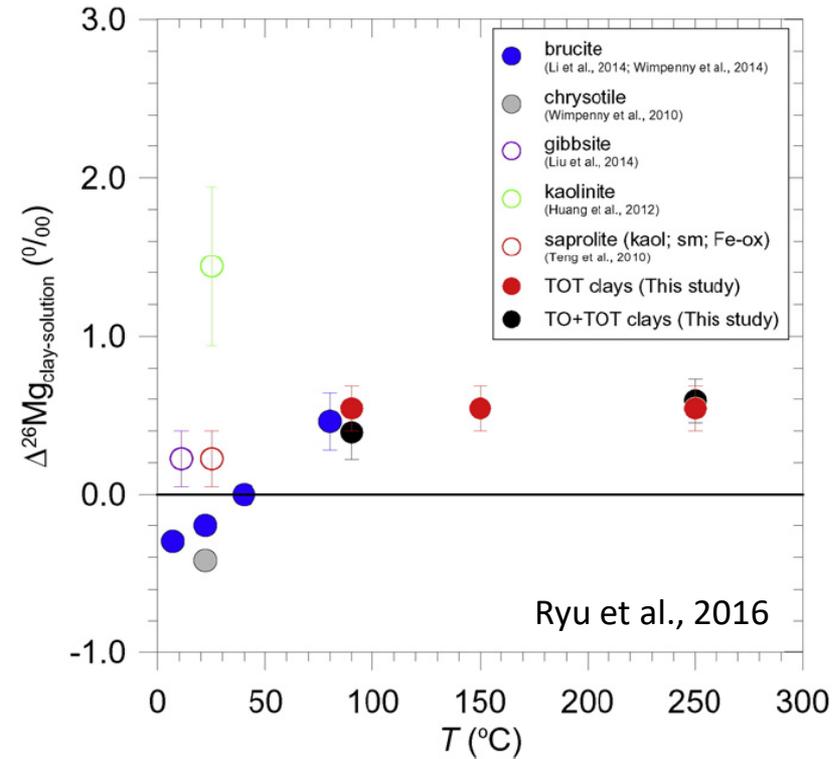
固定在矿物晶格中

吸附在矿物表面或层间

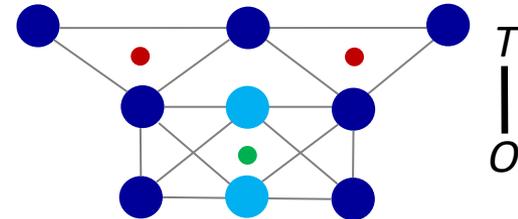
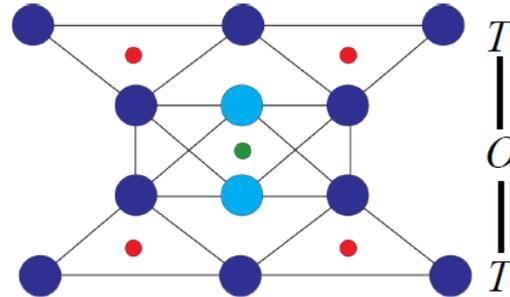
Wimpenny et al., 2014



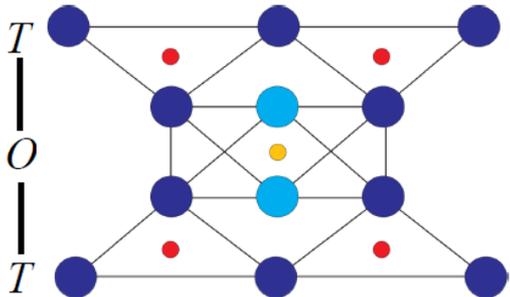
晶体结构控制镁同位素分馏



三八面体层状硅酸盐



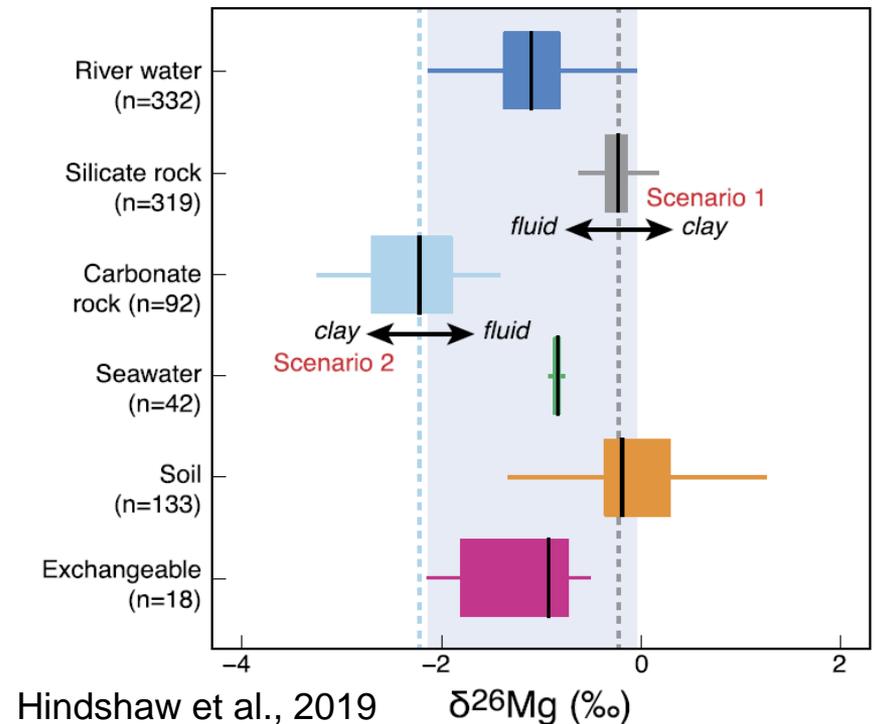
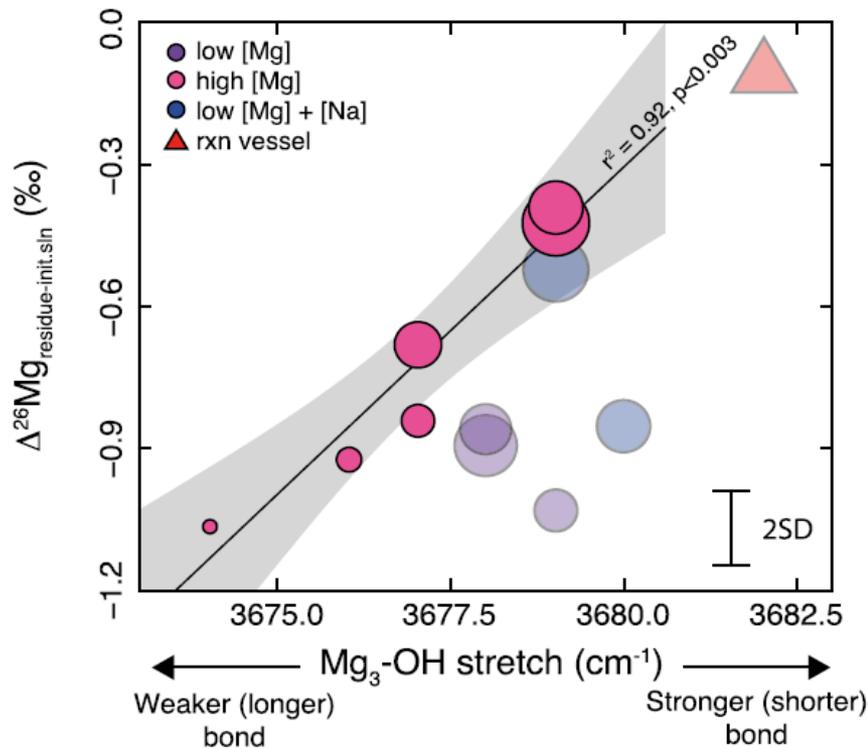
二八面体层状硅酸盐



- Hydroxyl
- Magnesium
- Aluminium

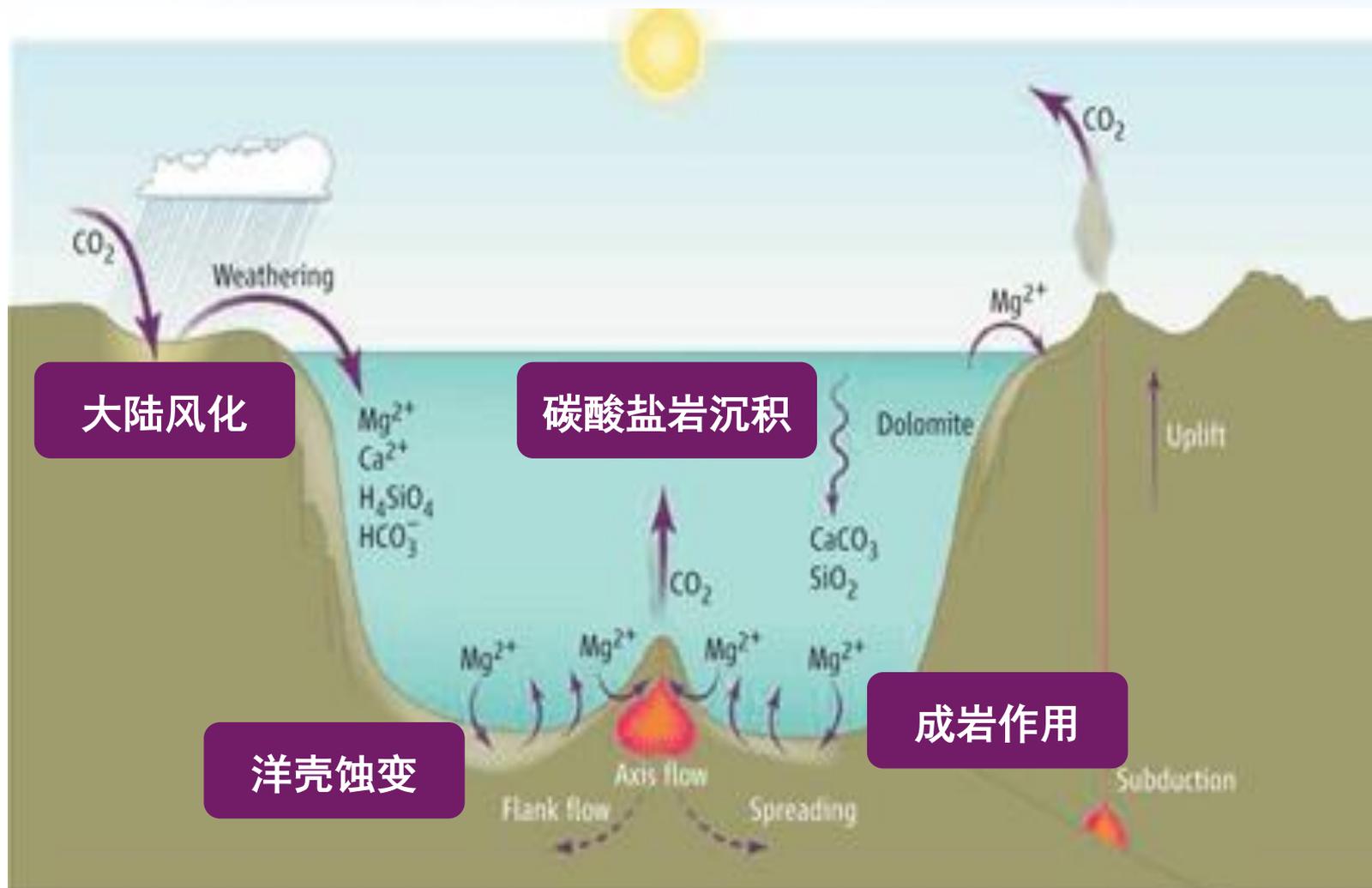
粘土矿物晶体结构、配位数影响Mg同位素分馏的方向和程度

Mg-O键长控制镁同位素分馏



粘土矿物与流体之间的Mg-O键相对强度决定Mg同位素分馏的方向和程度

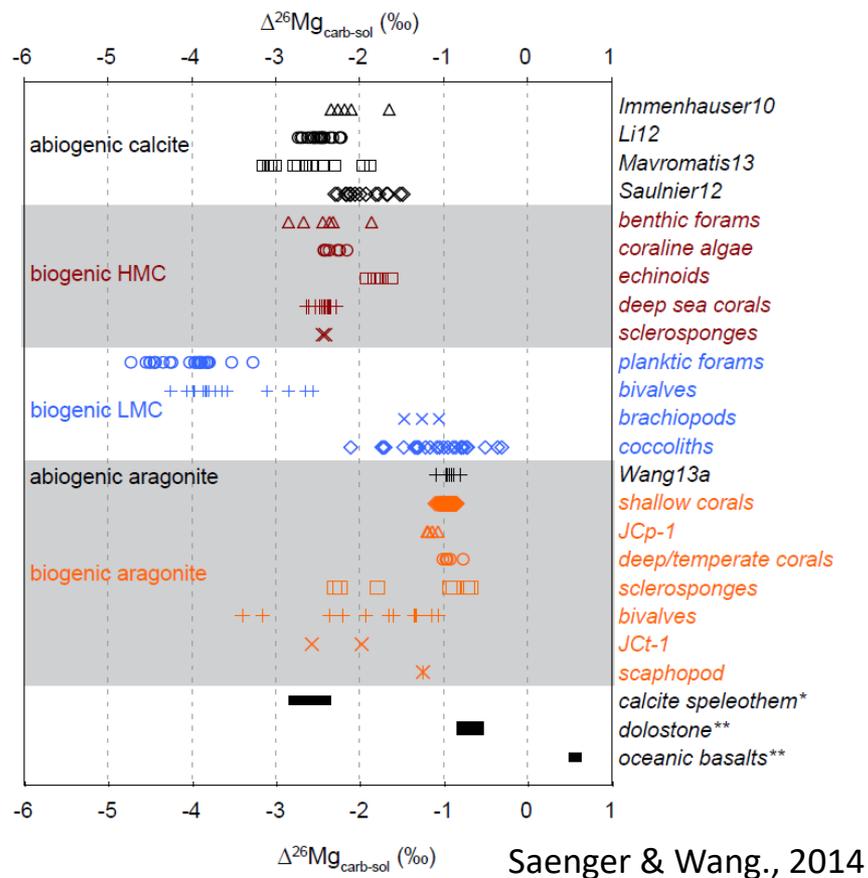
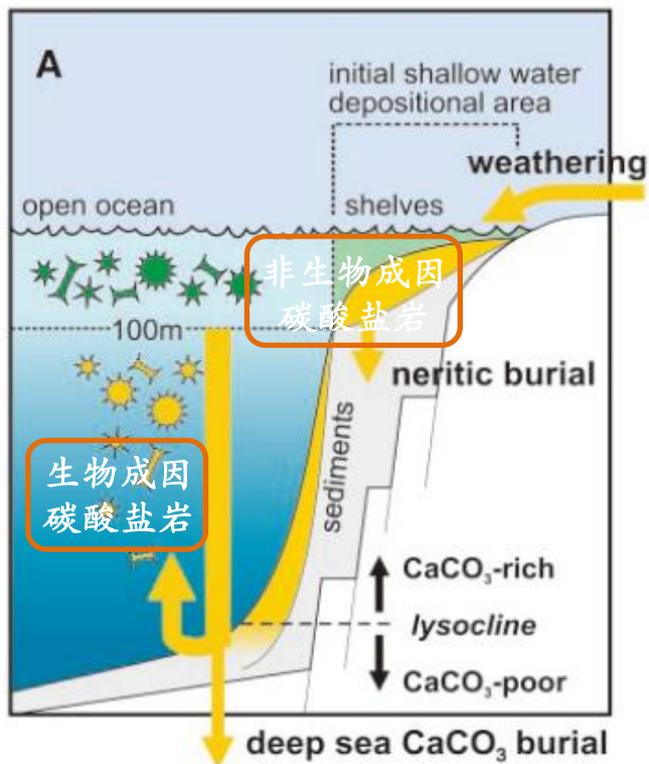
控制全球镁循环的表生地质过程



Elderfield, 2010

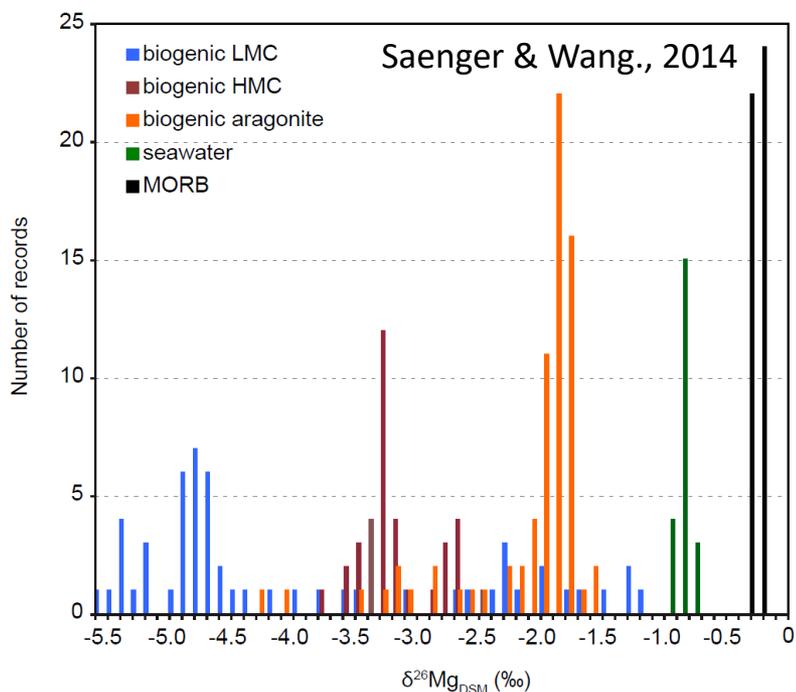
碳酸盐沉积过程镁同位素行为

Ridgwell et al., 2003



影响因素： 矿物、温度、生长速率、动力学分馏、生物效应

非生物成因碳酸盐岩镁同位素控制因素



Mg-O bond length

Oh et al., 1973, Althoff, 1977, Finch and Allison, 2007

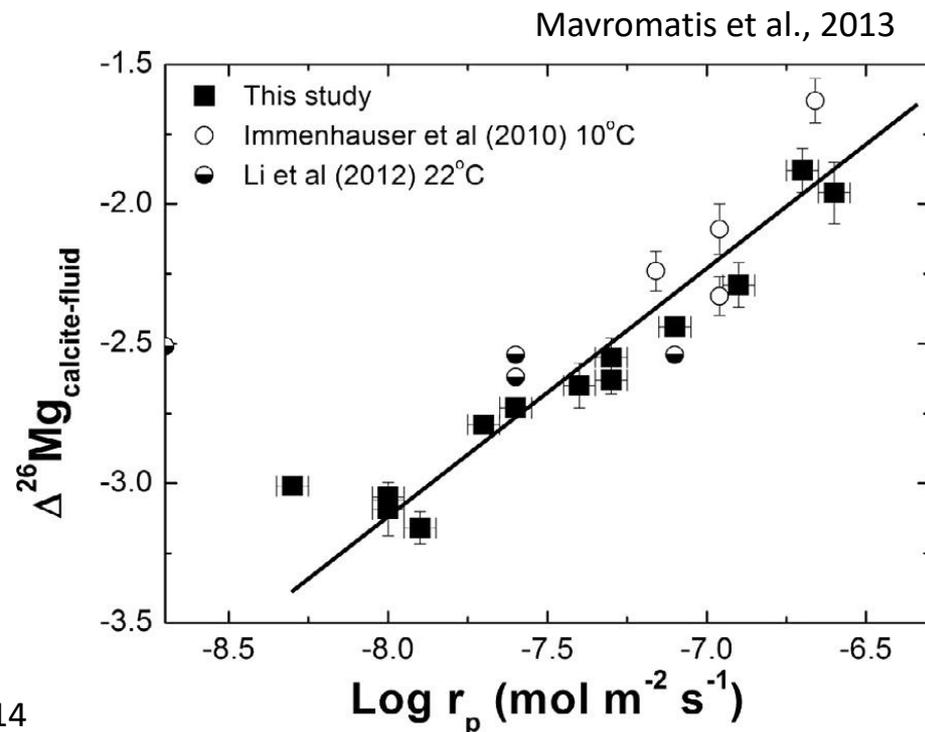
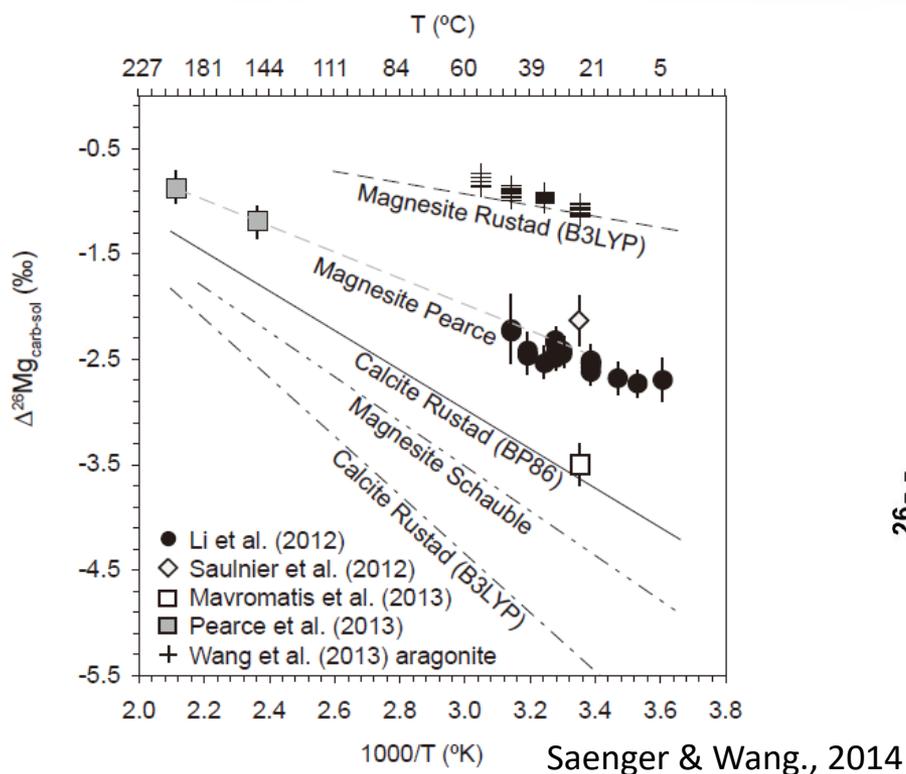
Mineral	Mg-O Bond length (Angstrom)	Coordination number
Dolomite	2.08	6
Magnesite	2.105	6
Calcite	2.09-2.13	6
Aragonite	2.08	9

From Wang Zhengrong's slides

矿物类型：方解石 < 菱镁矿 < 白云石 < 文石

碳酸盐矿物Mg-O键：键强越强富集重Mg同位素

非生物成因碳酸盐岩镁同位素控制因素

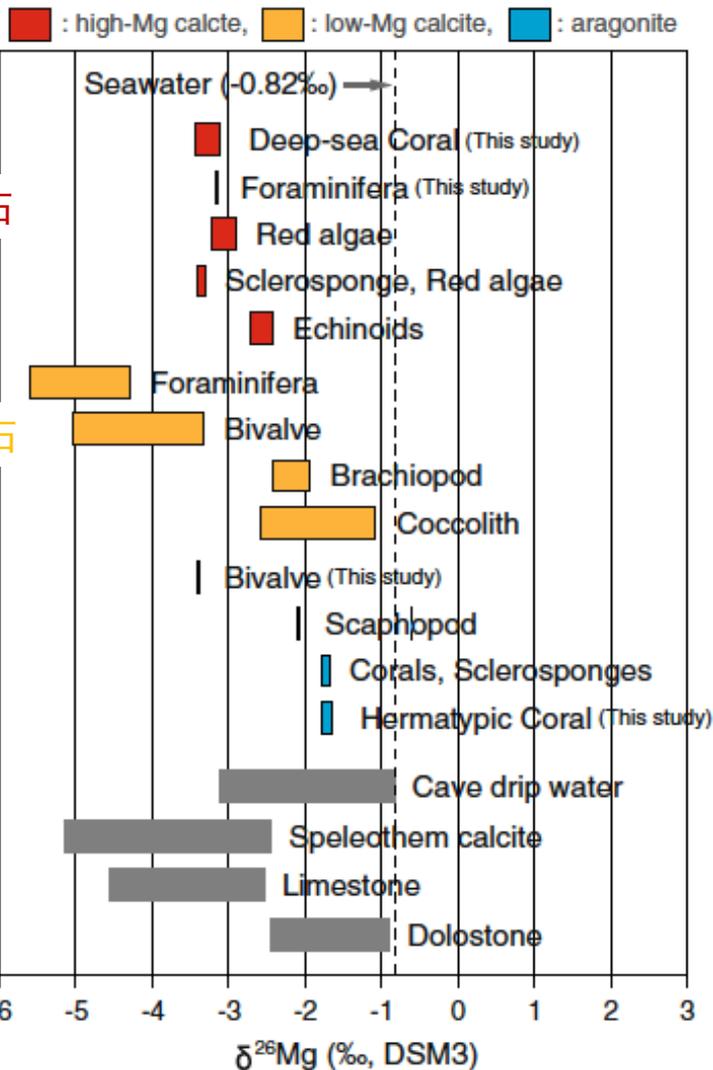


$\Delta^{26/24}\text{Mg}_{\text{carb-sol}}$ 随温度增加而变小
分馏程度约为0.01‰/°C

沉淀速率越快 $\Delta^{26/24}\text{Mg}_{\text{cal-sol}}$ 越小；
方解石生长速度越快其中水合Mg越高

生物成因碳酸盐岩镁同位素控制因素

Yoshimura et al., 2011

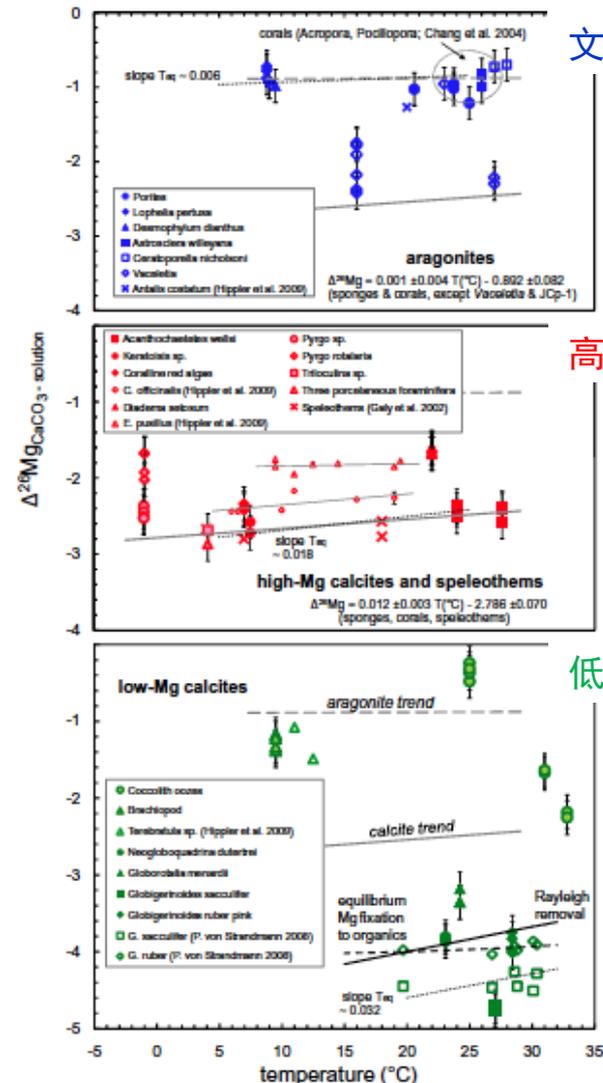


高镁方解石

低镁方解石

文石

Wombacher et al., 2011

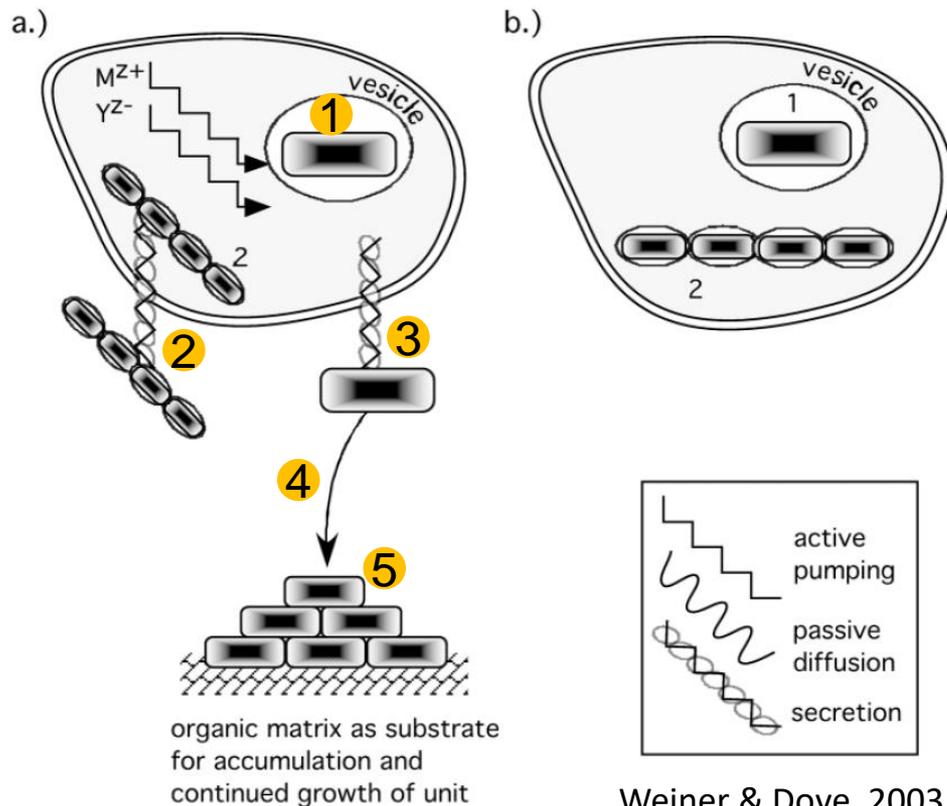


文石

高镁方解石

低镁方解石

生物成因碳酸盐岩镁同位素控制因素



导致镁同位素生物效应的可能原因:

- 1 Mg²⁺通过细胞膜扩散到沉淀位时轻Mg同位素优先通过;
- 2 Mg²⁺与生物分子发生络合作用;
- 3 沉淀形成非晶态CaCO₃会导致同位素分馏程度降低;
- 4 改性剂的存在导致Mg²⁺进入晶体的活化能垒发生变化;
- 5 生物作用促进沉淀反应朝正向进行速率增加, 导致同位素分馏程度降低;



提纲

CONTENTS

01

表生地质过程与全球镁循环

02

表生地质过程镁同位素行为

03

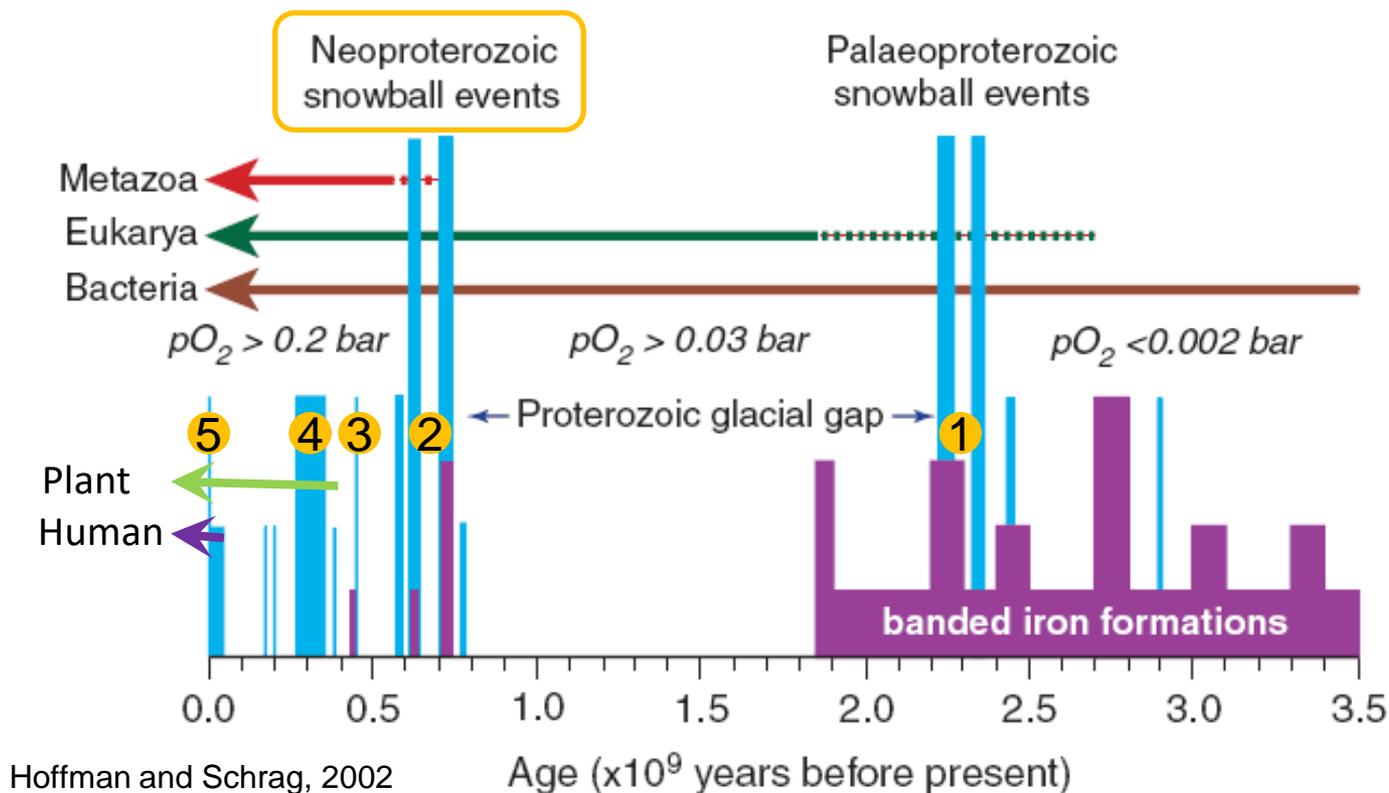
镁同位素示踪表生地质过程

- 雪球地球结束过程
- 东亚季风降水重建

04

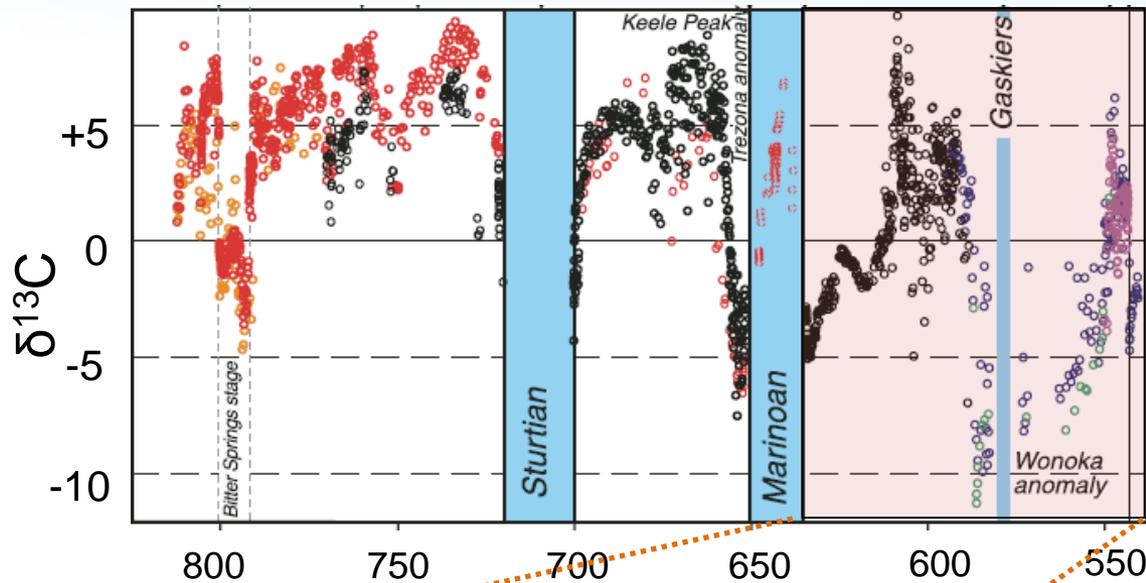
展 望

地质历史时期重大冰期与生物演化



- ◆ 地质历史时期地球经历了5次与生命演化进程相关的重大冰期事件
- ◆ 与后生动物演化密切联系的新元古代冰期事件 (720-580 Ma) 最引人关注

新元古代全球冰期结束与后生动物出现



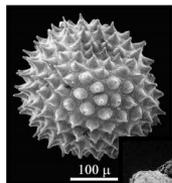
Halverson et al., 2005

635 Ma

542 Ma

埃迪卡拉纪

寒武纪



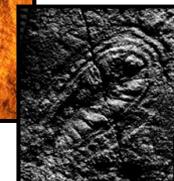
100 μ



Acanthomorph Acritarchs

Animal Embryos

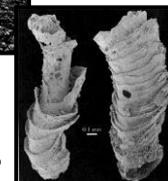
Multicellular Algae



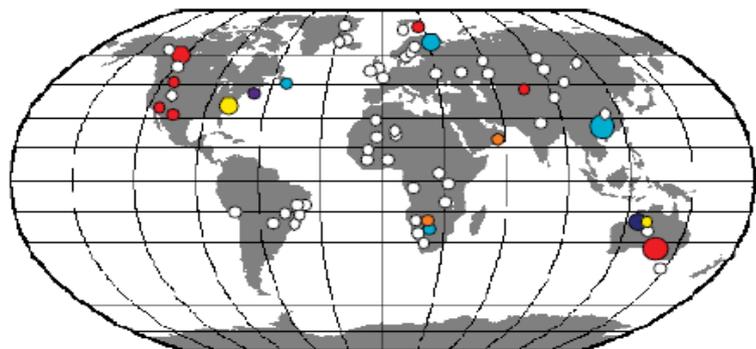
Ediacara-type Biota

Macroscopic Bilaterians?

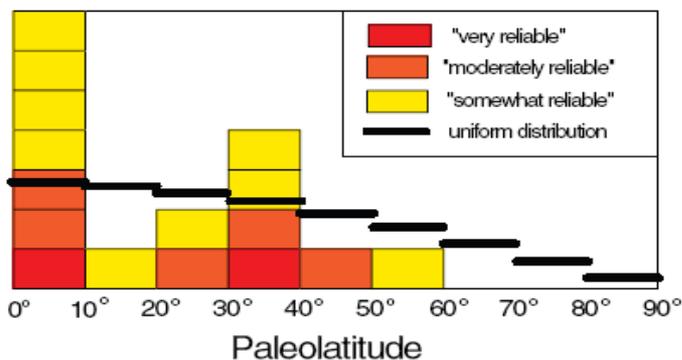
Biominingalizing Metazoans



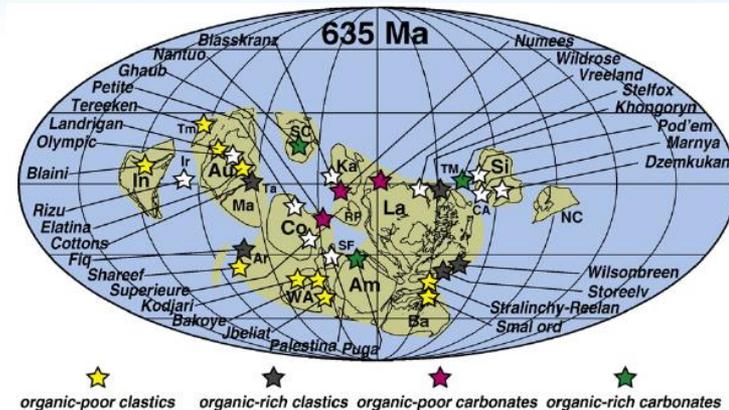
新元古代冰川沉积物全球分布



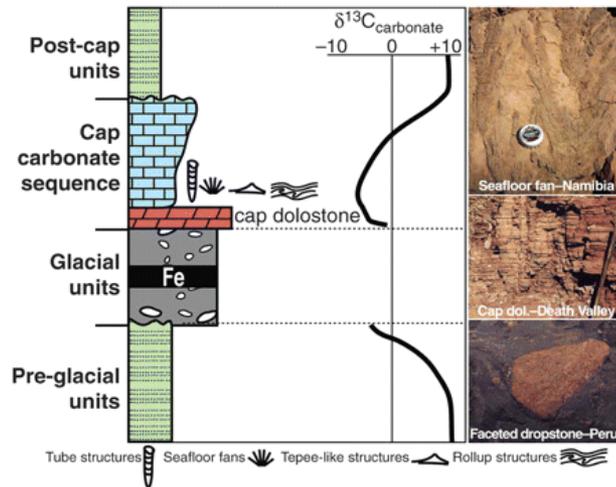
● 00-10° ● 10-20° ● 20-30° ● 30-40° ● 40-50° ● 50-60° ○ no data
 ● "very reliable" ● "moderately reliable" ● "somewhat reliable"



Hoffman & Schrag, 2002; Lorentz and Corsetti, 2007; Hoffman & Li, 2009



★ organic-poor clastics ★ organic-rich clastics ★ organic-poor carbonates ★ organic-rich carbonates

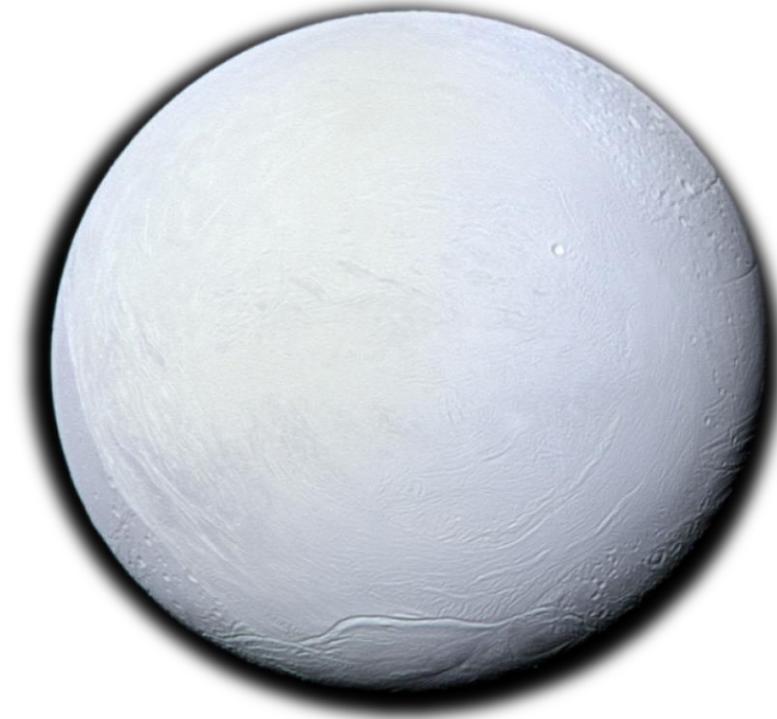


- ◆ 全球分布低纬度冰川沉积物 → 冰川延伸到地球赤道
- ◆ 全球分布盖帽碳酸盐岩 → 全球快速变暖

“Hard Snowball Earth” 假说



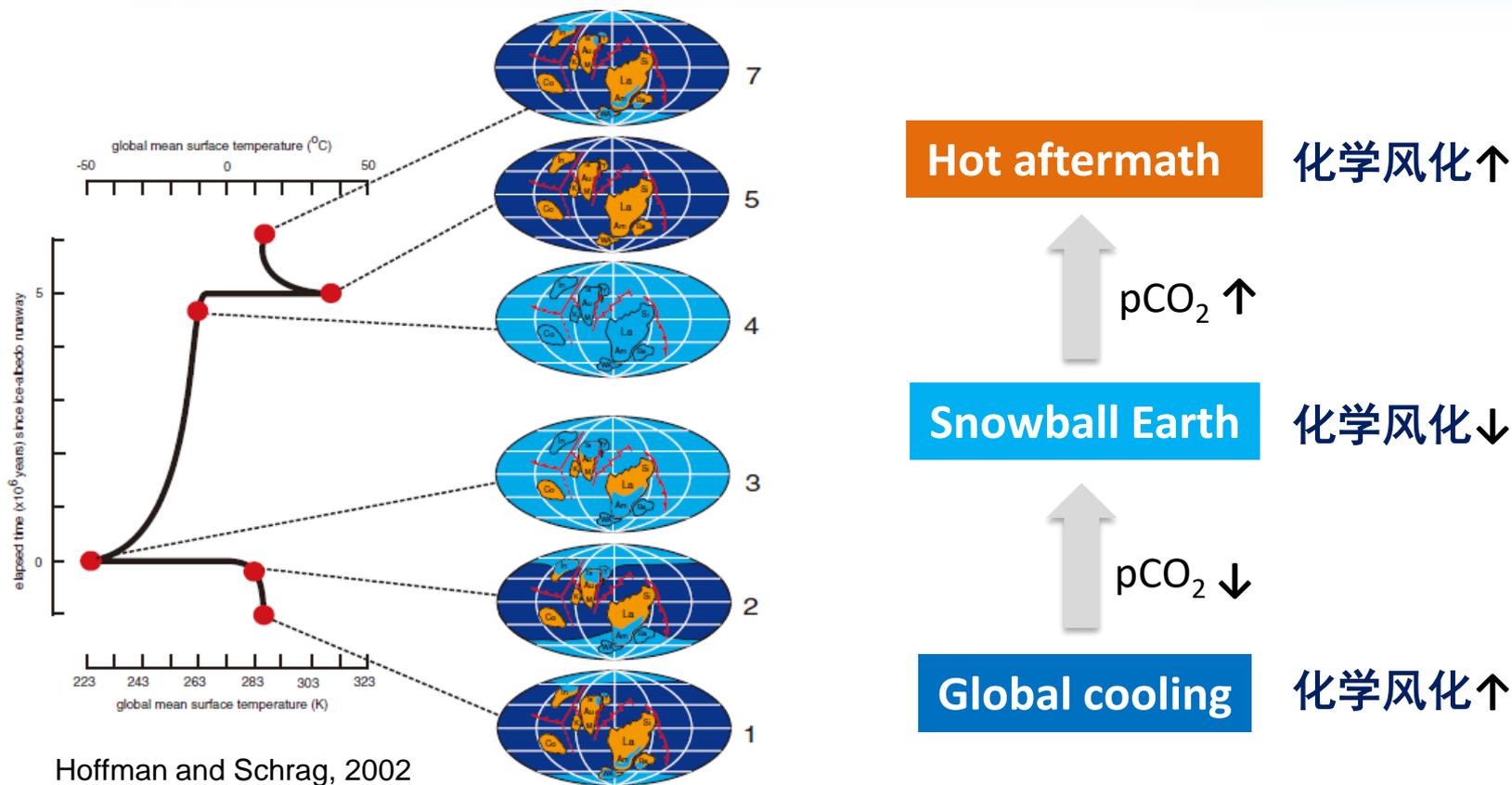
Paul Hoffman



Hard Snowball Earth

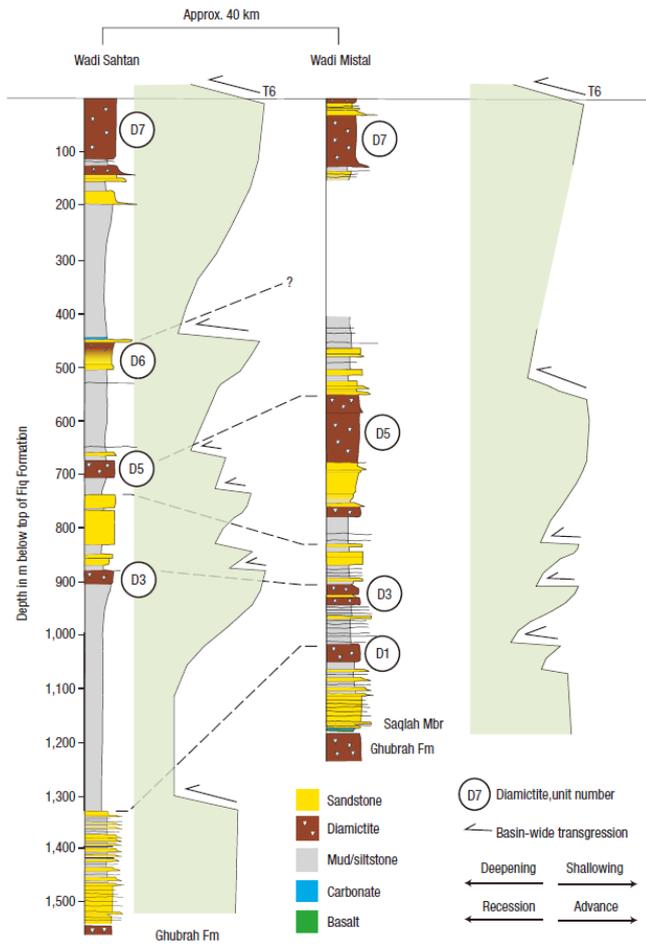
新元古代成冰纪时期整个地球被完全冰封——形成“雪球地球”

“Hard Snowball” 与化学风化作用

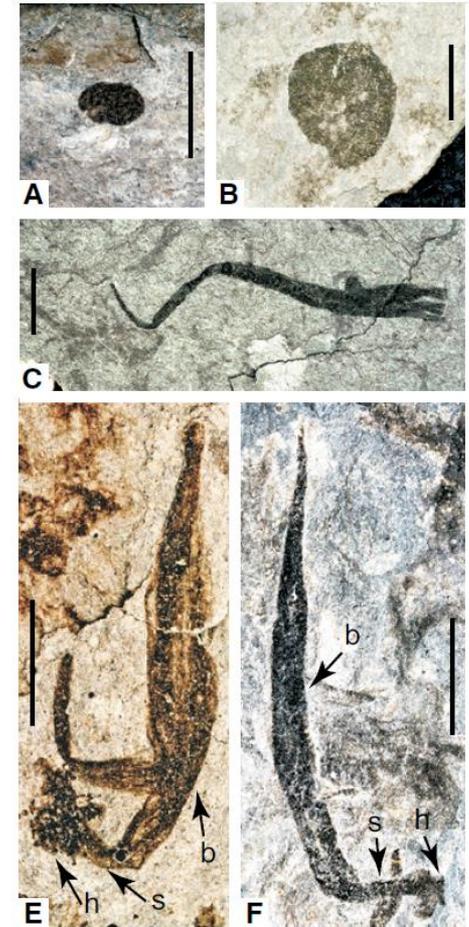
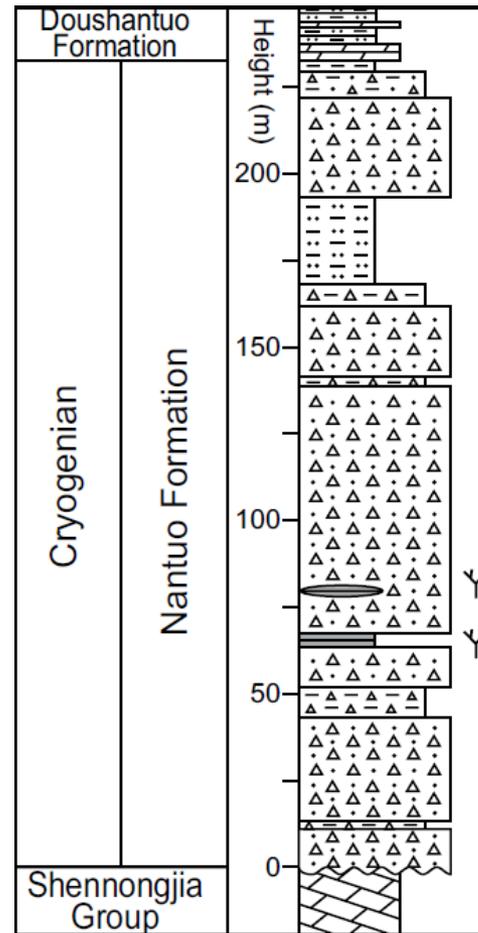


- ◆ 化学风化作用增强 → $p\text{CO}_2$ 降低 → 雪球地球 → 化学风化作用停滞
- ◆ 大气 CO_2 累积 → 温室效应 → 雪球地球解体 → 强烈化学风化作用

沉积学和化石记录的挑战



Allen & Etienne, 2008

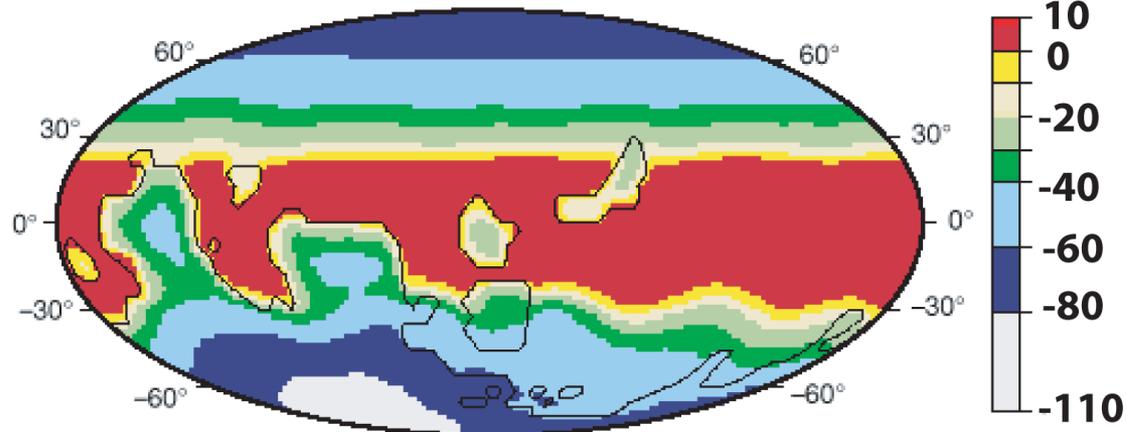


Ye et al., 2015

“Soft Snowball Earth” 假说



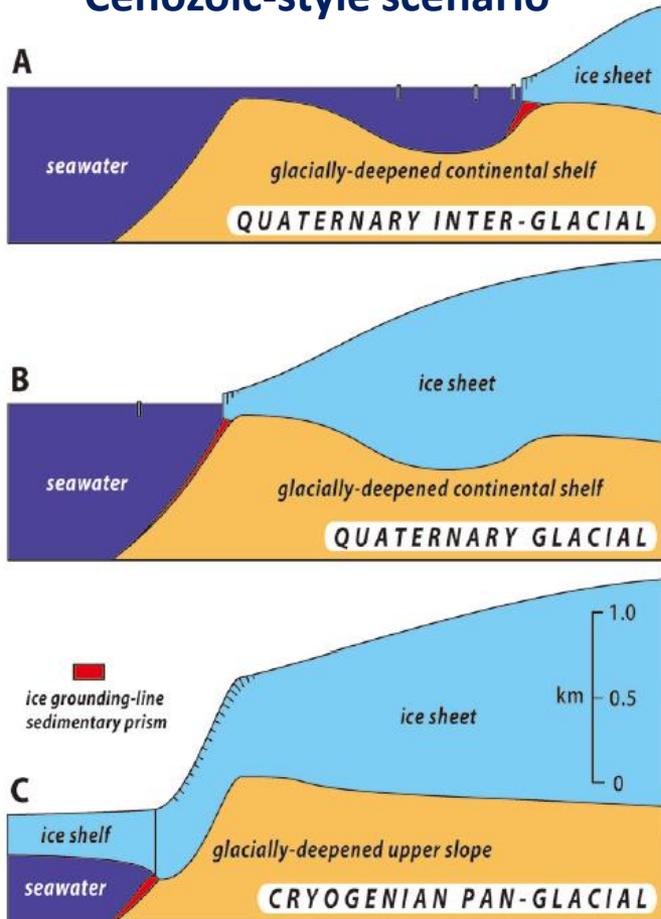
Ice-sheet thickness (m)



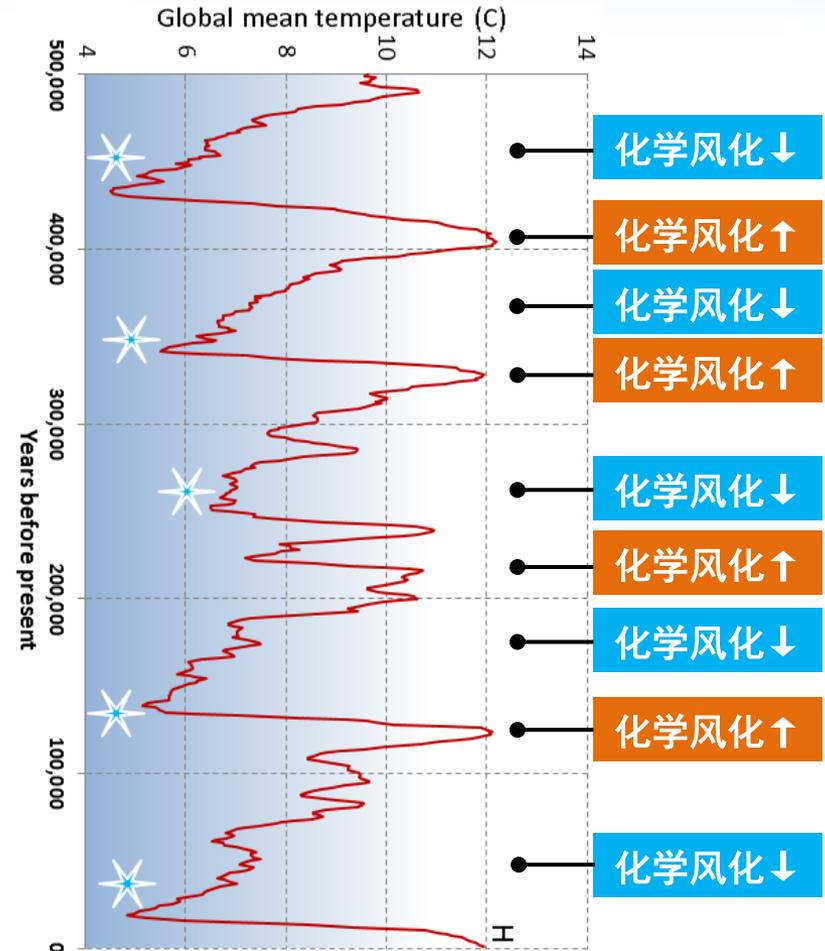
Surface temperature (°C) *Hyde et al. (2000)*

“Soft Snowball” 与化学风化作用

Cenozoic-style scenario



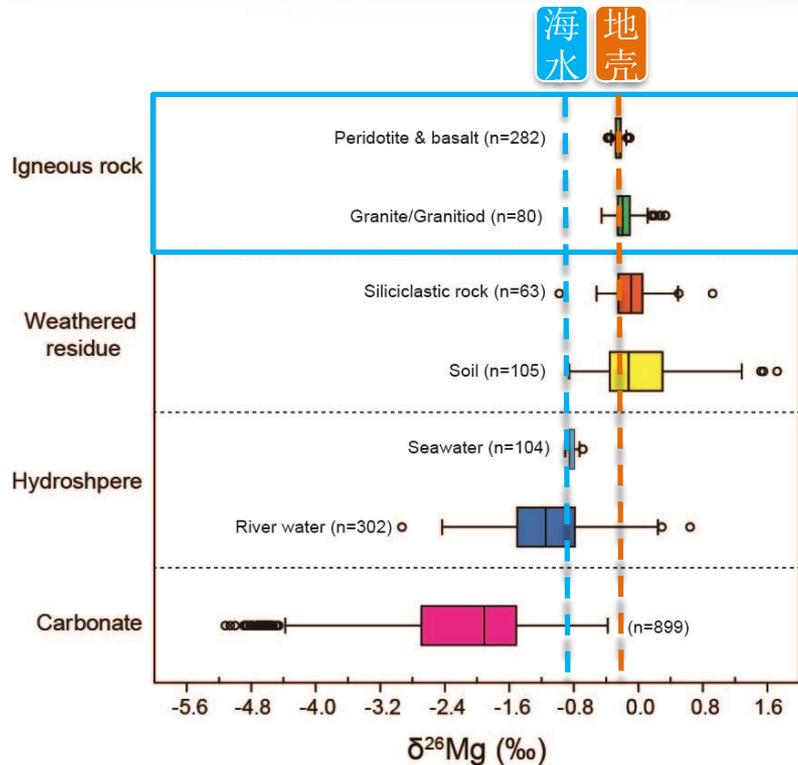
Hoffman, 2009



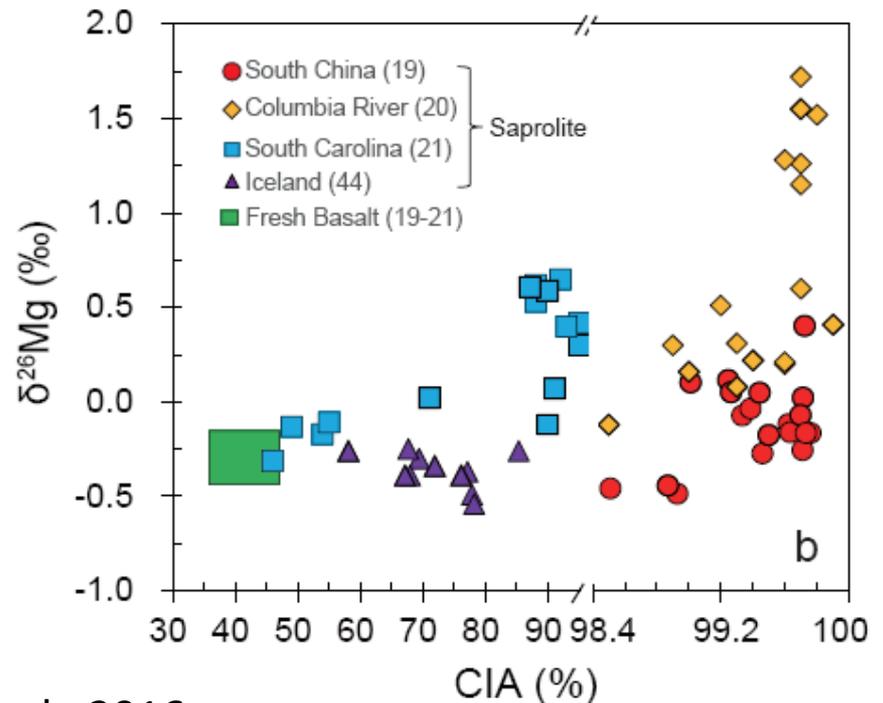
◆ **Soft Snowball假说：冰期-间冰期旋回**

◆ **冰期** → 化学风化作用减弱； **间冰期** → 化学风化作用增强

镁同位素示踪古化学风化作用

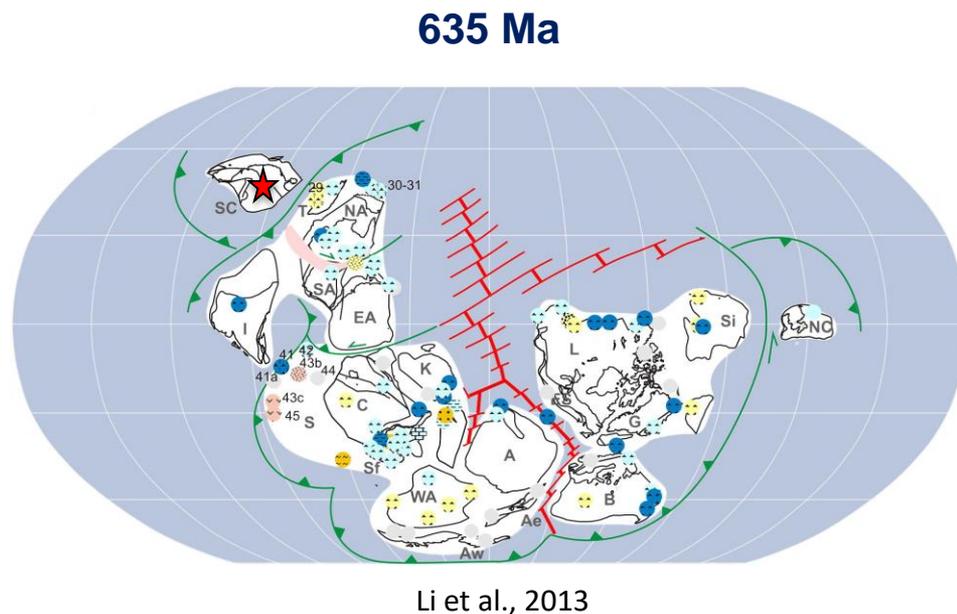
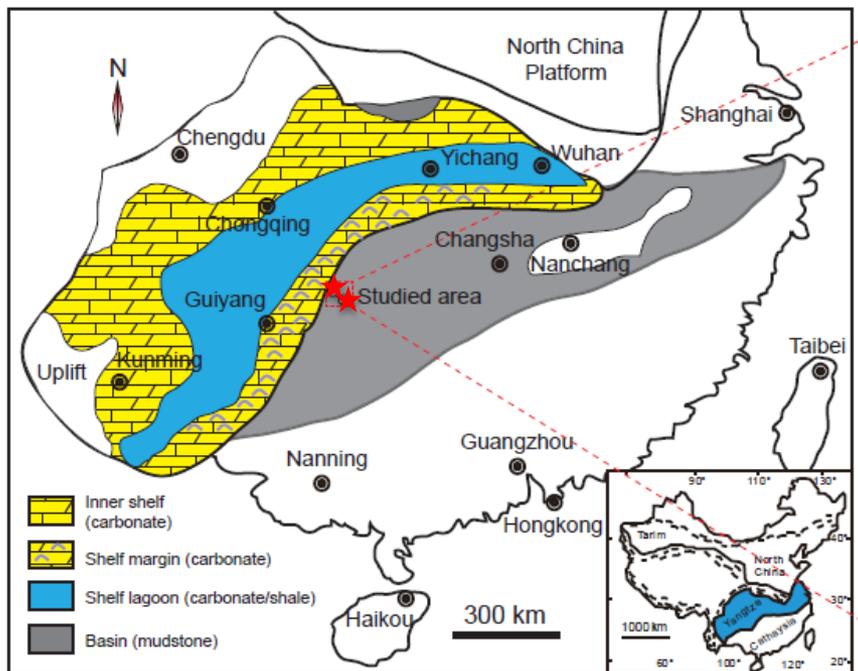


Huang et al., 2016



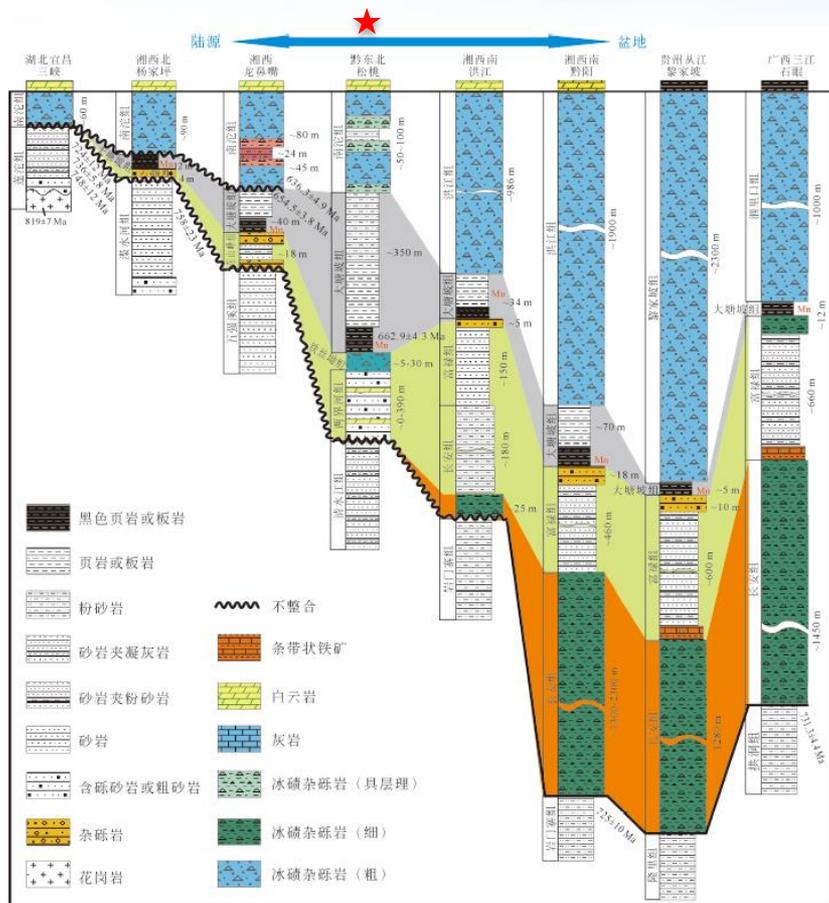
- ◆ 地壳最主要的镁储库—岩浆岩具有相对均一的镁同位素组成
- ◆ 化学风化作用是导致镁同位素发生分馏的主要过程
- ◆ 风化残余物的镁同位素组成随着风化强度的增加而逐渐变重

研究区地质背景

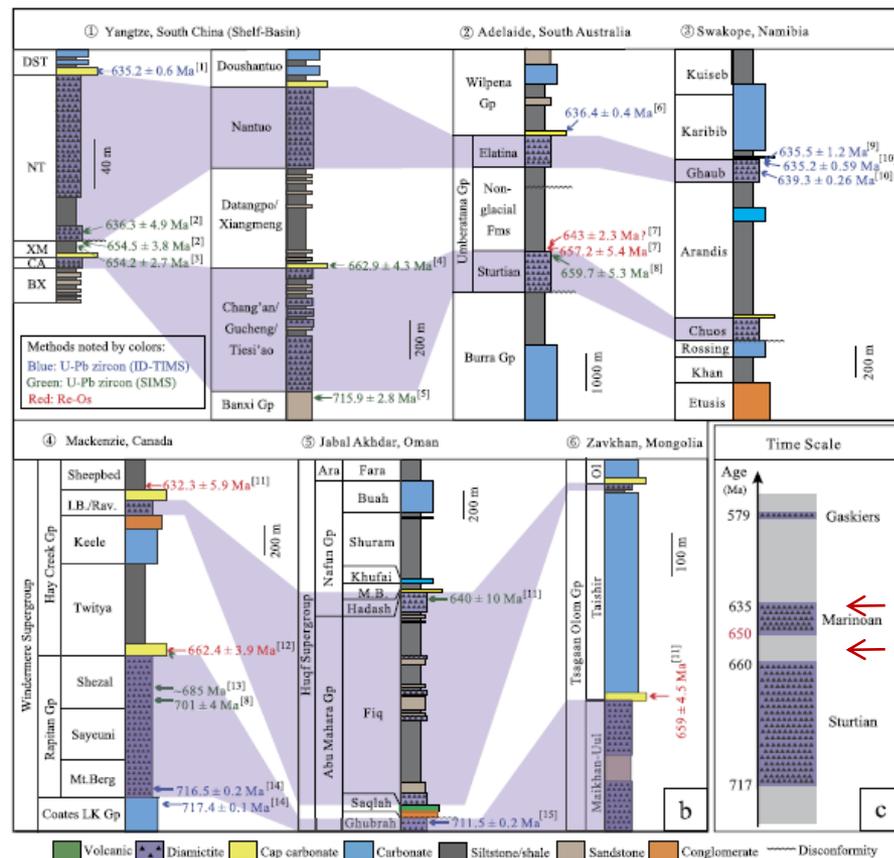


- 研究的钻孔和露头剖面位于贵州铜仁地区，处于扬子地台斜坡相
- 华南板块在成冰纪位于高纬度 ($> 30^{\circ} \text{N}$)

连续沉积完整记录Marinoan冰期过程



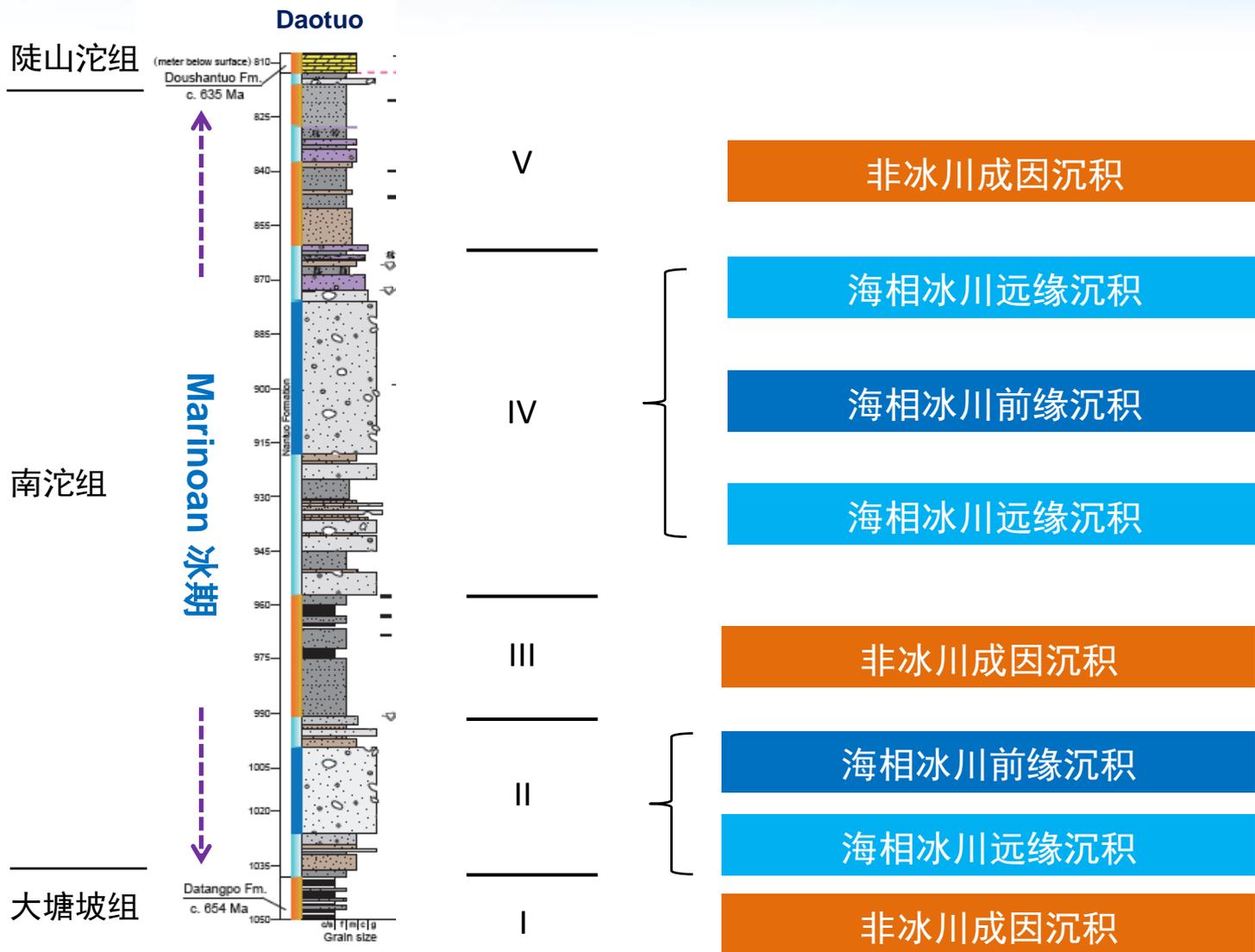
朱茂炎等, 2016



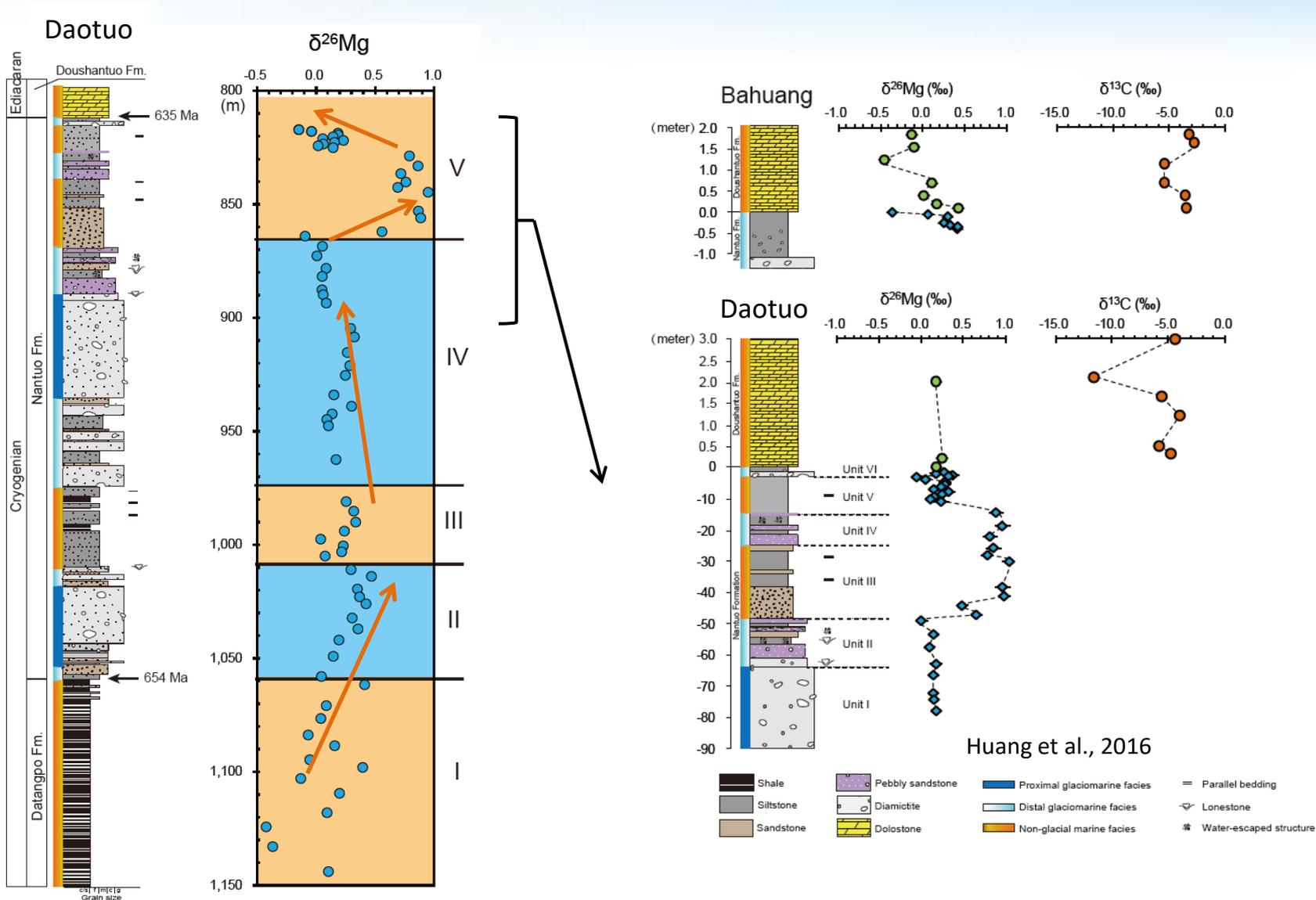
Bao et al., 2018

- 扬子地台斜坡相：完整保存了南沱冰期过程的沉积记录
- 南沱组沉积年龄与全球Marinoan冰期时限一致(~ 650-635 Ma)

沉积地层与沉积相分析

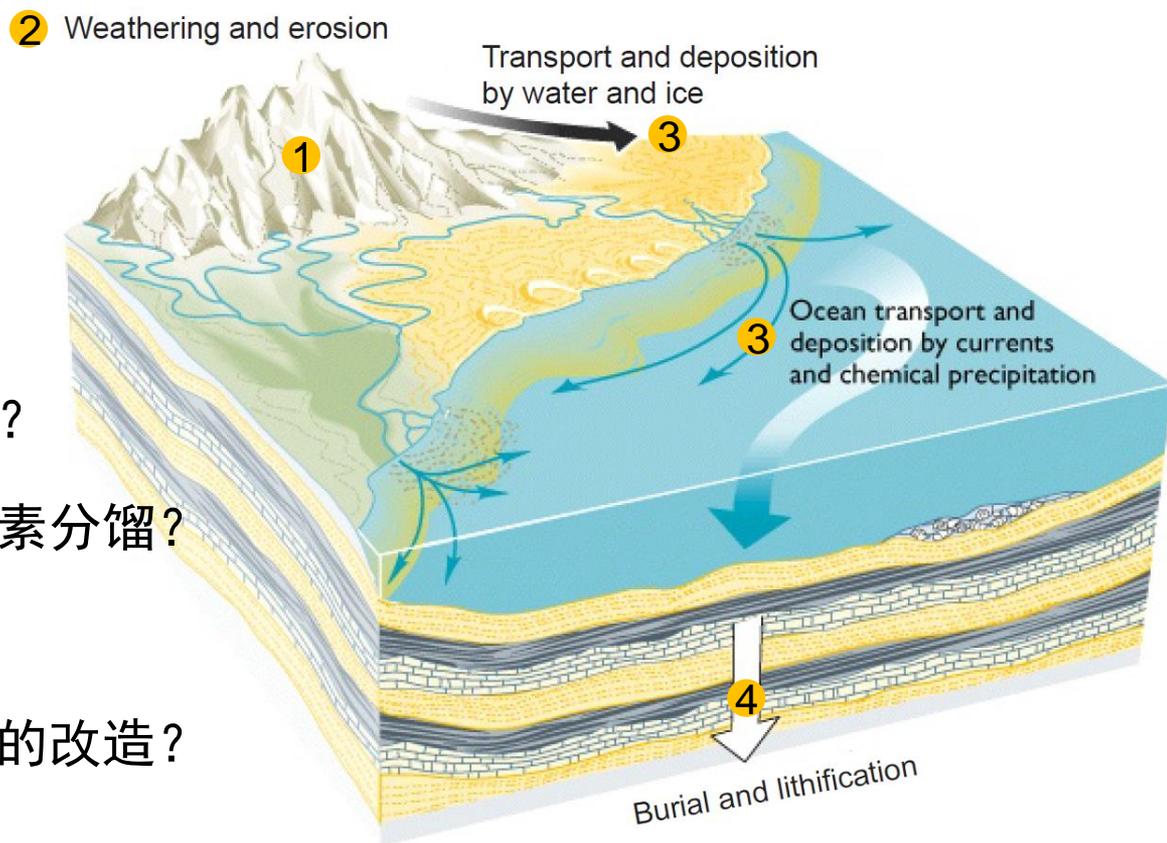


同位素地球化学组成特征



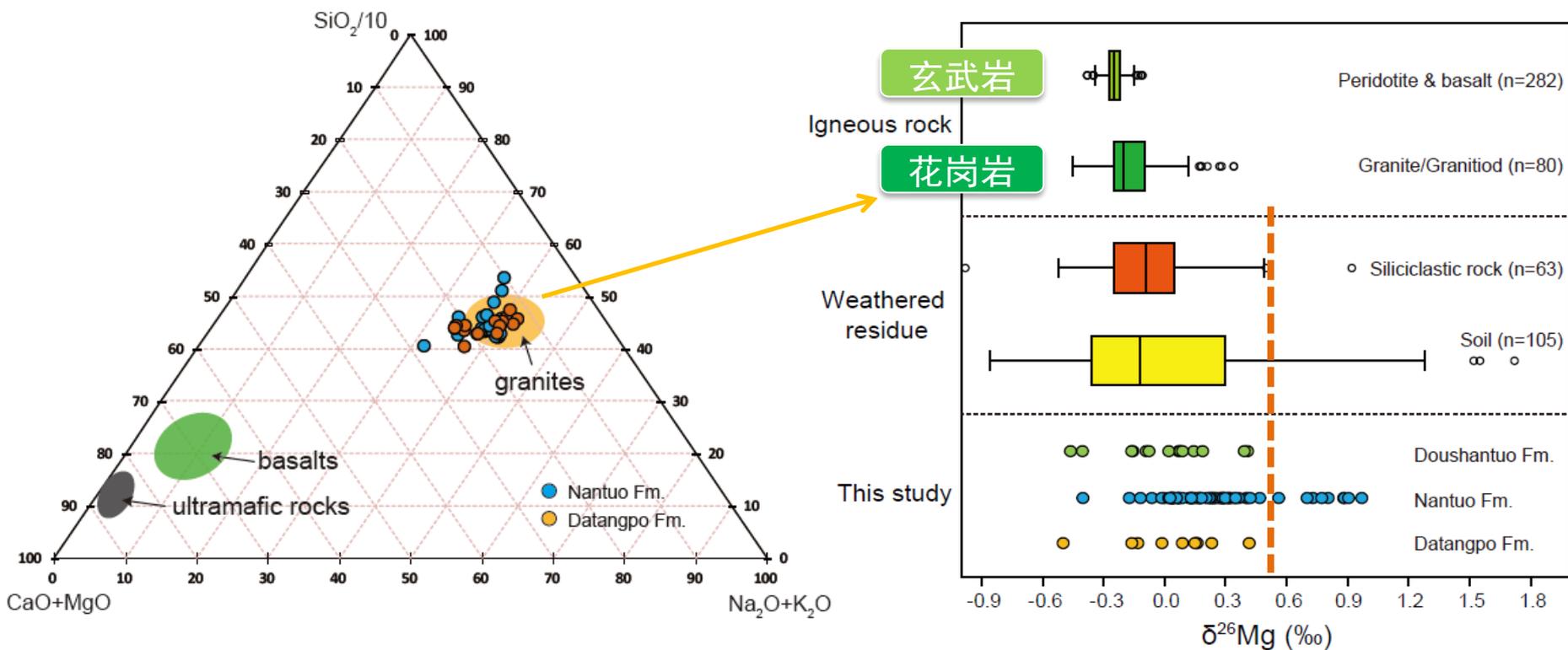
影响碎屑沉积物镁同位素组成的可能因素

- 1 源区镁同位素组成不均一？
- 2 化学风化作用导致镁同位素分馏？
- 3 搬运过程发生物质分选？
- 4 成岩作用和低级变质作用的改造？



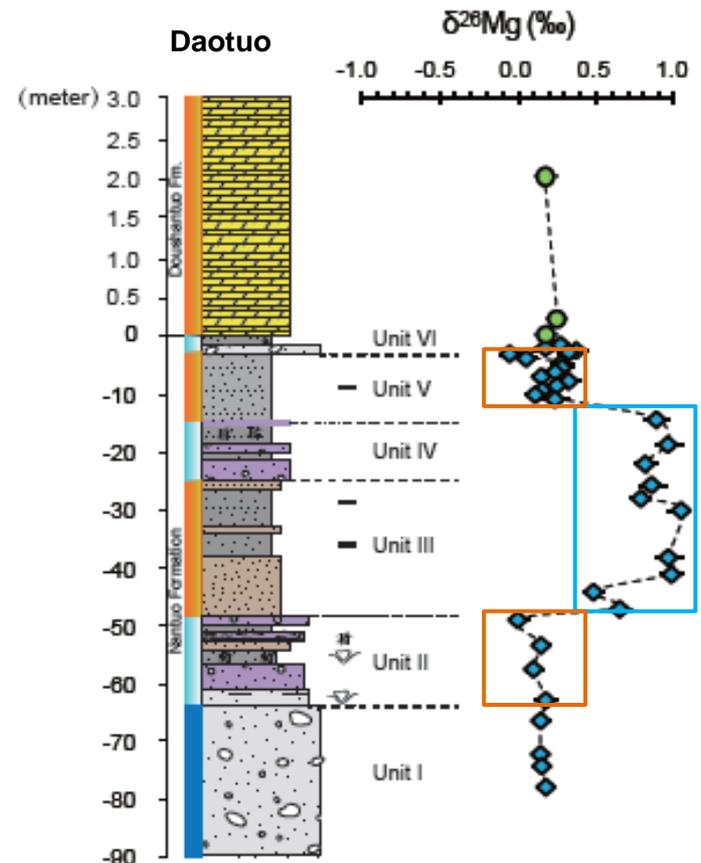
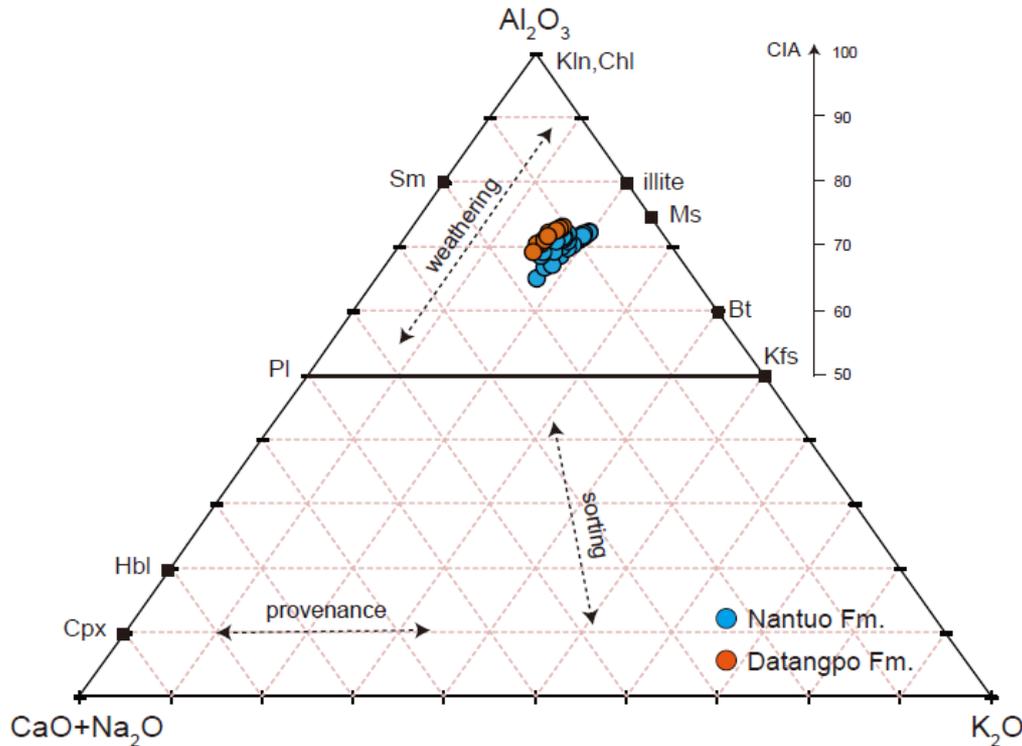
http://web.mst.edu/~sgao/g51/plots/1010_sedi_formation.jpg

源区物质组成差异的影响?



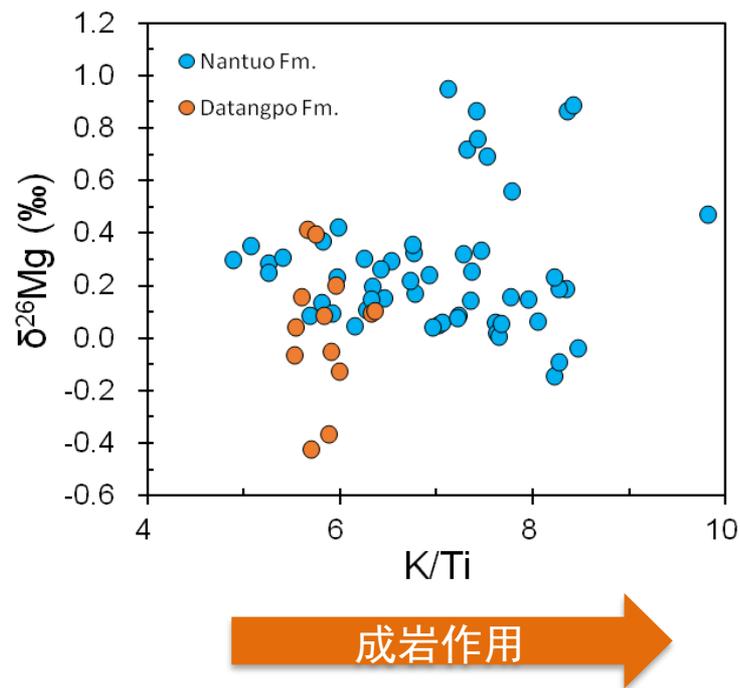
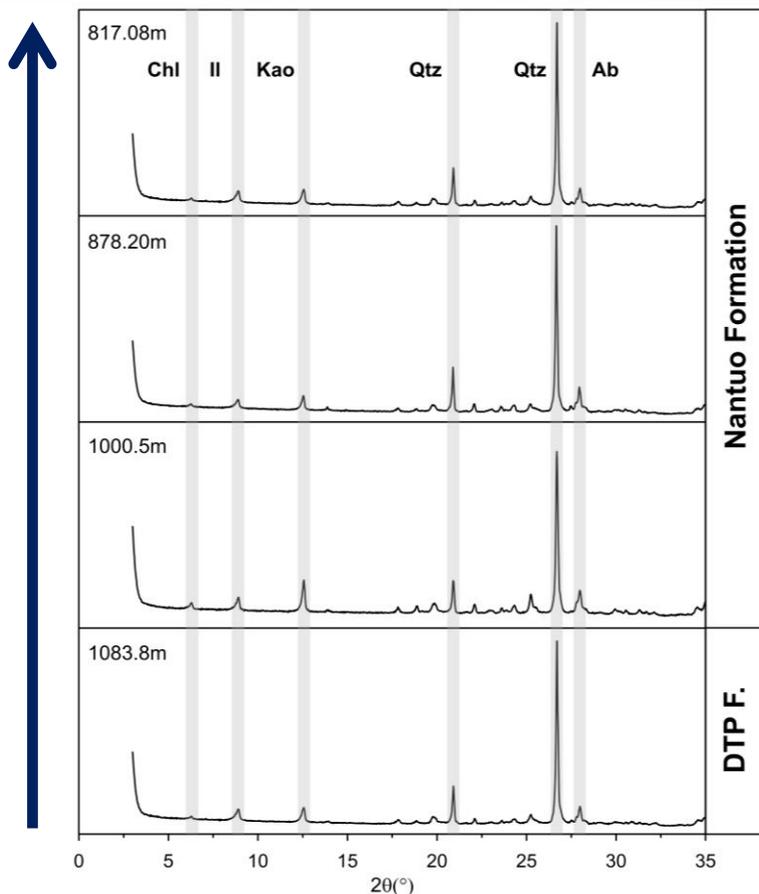
- 上地壳的主要组成成分具有相对均一的镁同位素组成
- 其他时代碎屑沉积岩 $\delta^{26}\text{Mg}$ 组成均低于+0.6‰

搬运分选作用的影响?



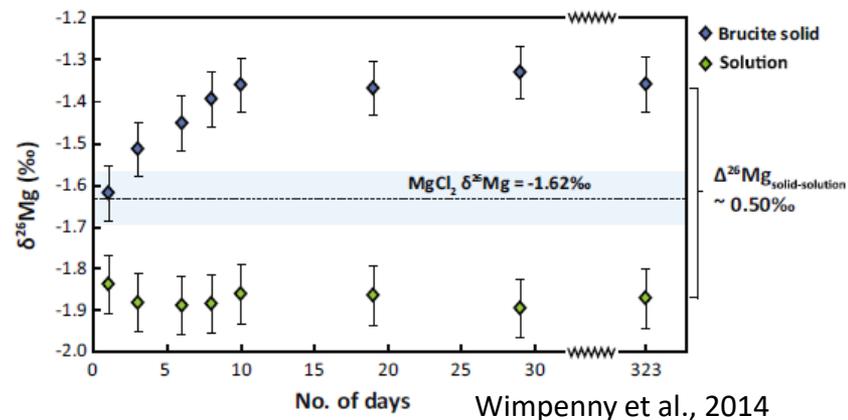
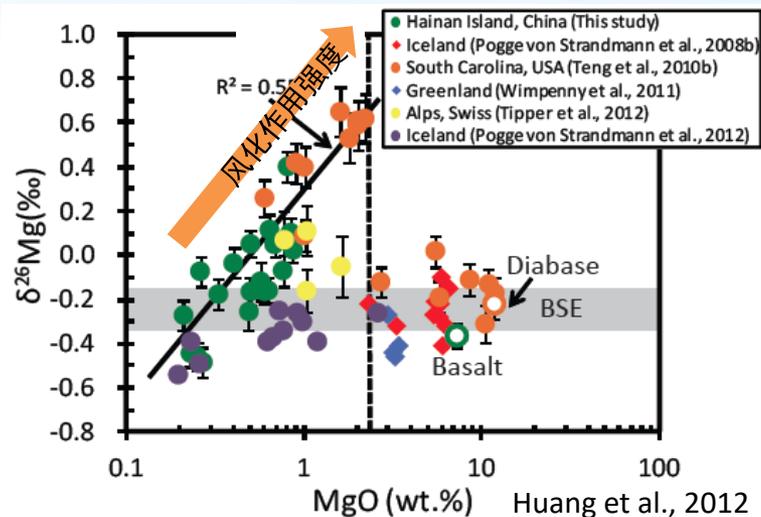
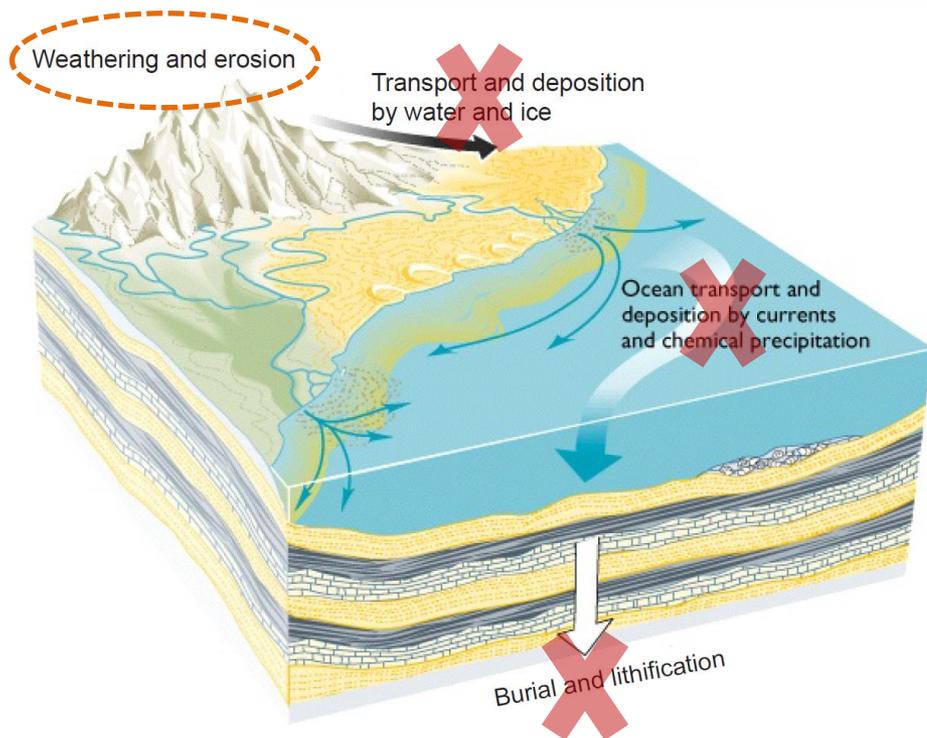
- A-CN-K分析 → 分选作用对主量元素组成影响有限
- 镁同位素组成变化不受岩性变化所控制

成岩和低级变质作用改造的影响?



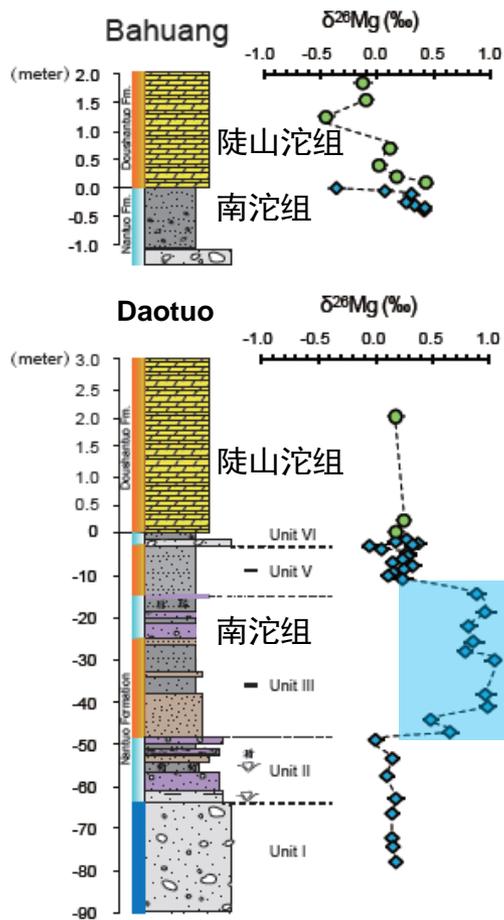
- 通过XRD和镜下观察均没有发现变质成因矿物
- $\delta^{26}\text{Mg}$ 与K/Ti之间无相关性 → 成岩作用影响有限

化学风化作用导致同位素分馏

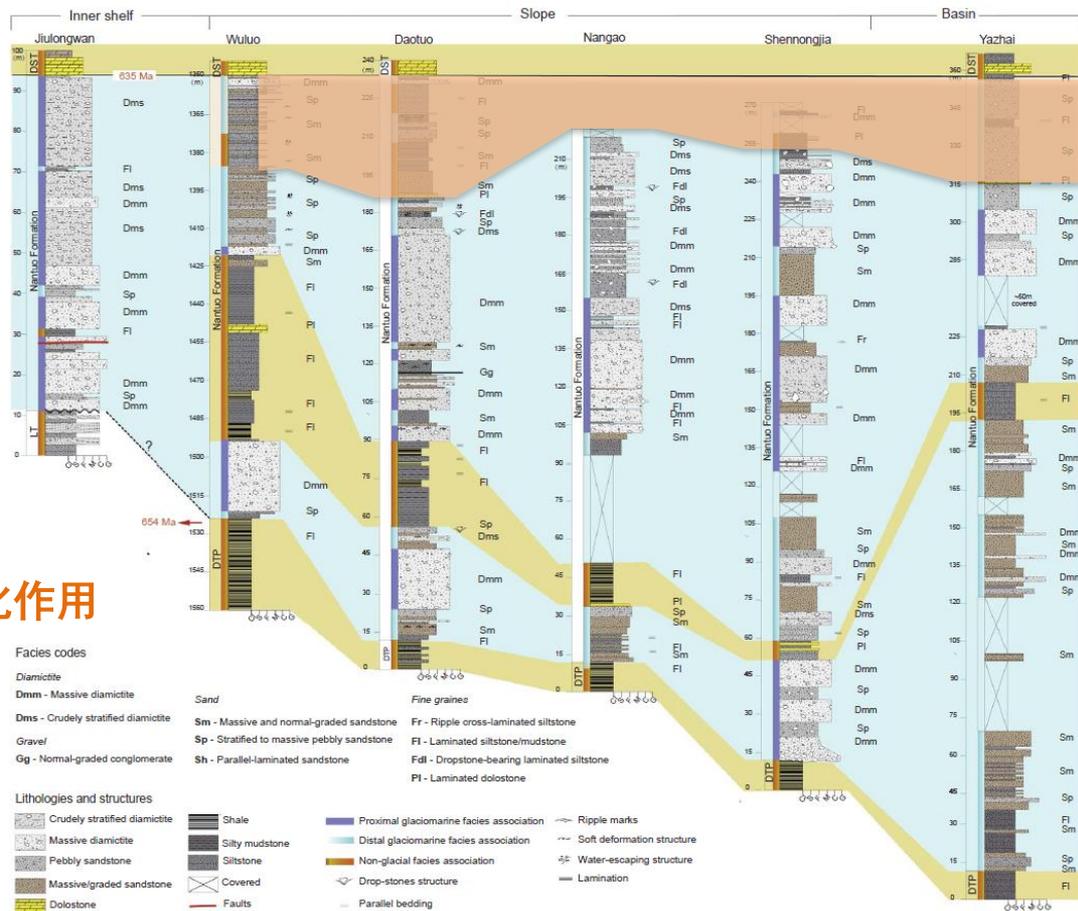


- 沉积岩中碎屑组分主要反映了来自大陆风化作用的信息
- 碎屑组分的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化主要反映大陆化学风化作用强度变化

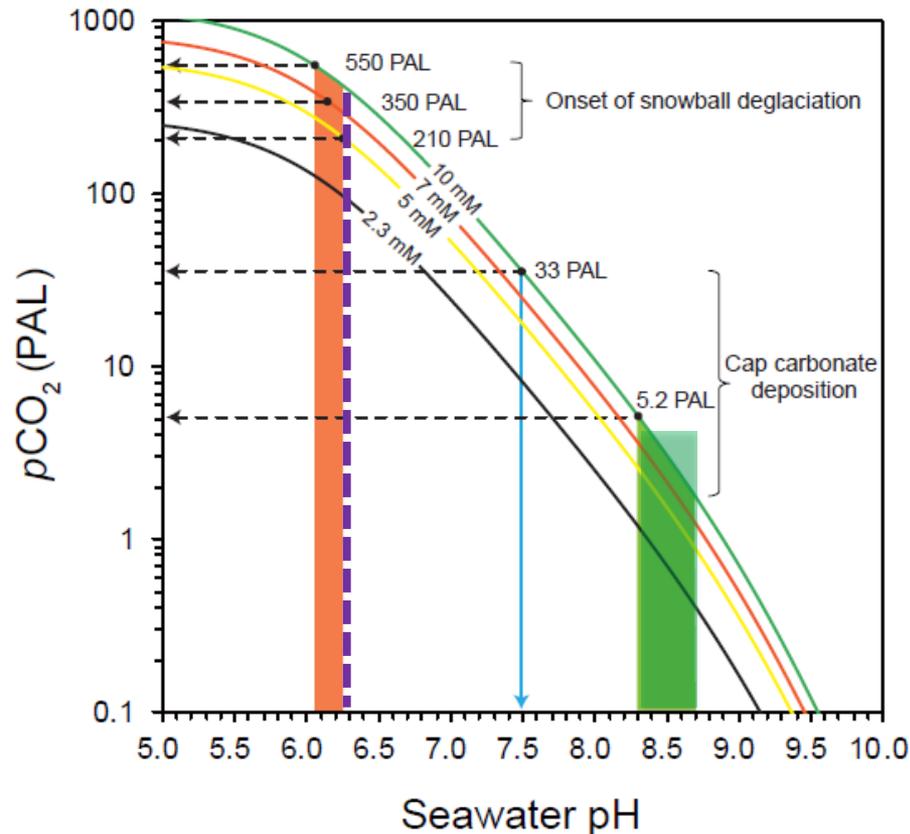
强烈化学风化作用发生在盖帽碳酸盐岩沉积前



强烈化学风化作用



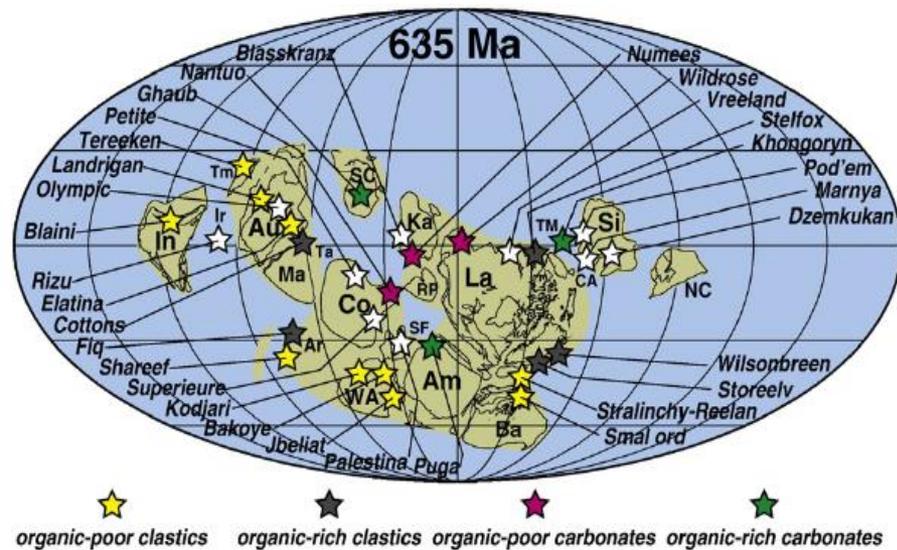
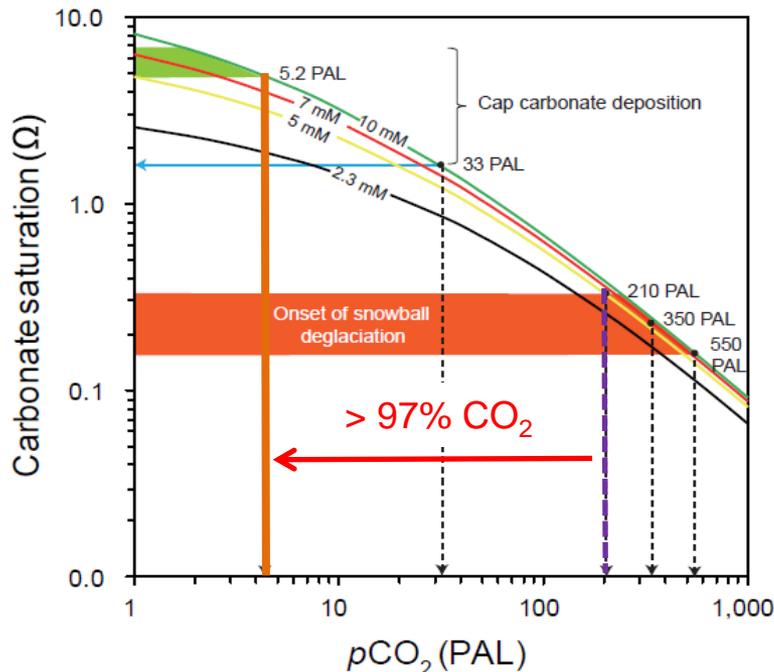
对盖帽碳酸盐岩沉积的指示



雪球地球解体时极高的大气 CO_2 → 海水pH ↓ → 抑制盖帽碳酸盐岩沉积

对盖帽碳酸盐岩沉积的指示

盖帽碳酸盐岩分布



Hoffman and Li, 2009

强烈化学风化作用 \rightarrow 大气 $p\text{CO}_2 \downarrow$ \rightarrow 海水 $\text{pH} \uparrow$ \rightarrow 盖帽碳酸盐岩沉积

提纲

CONTENTS

01

表生地质过程与全球镁循环

02

表生地质过程镁同位素行为

03

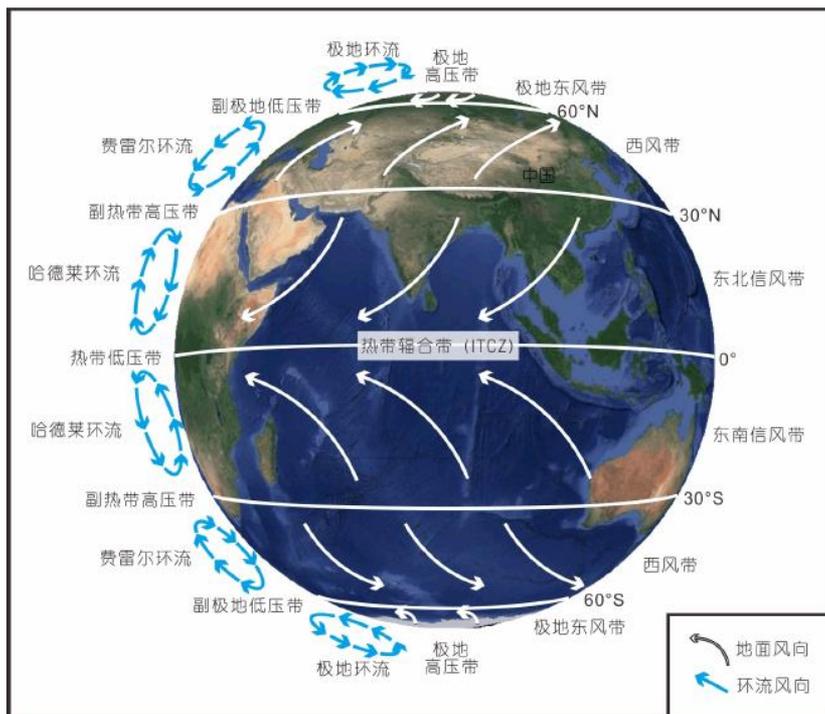
镁同位素示踪表生地质过程

- 雪球地球结束过程
- 东亚季风降水重建

04

展 望

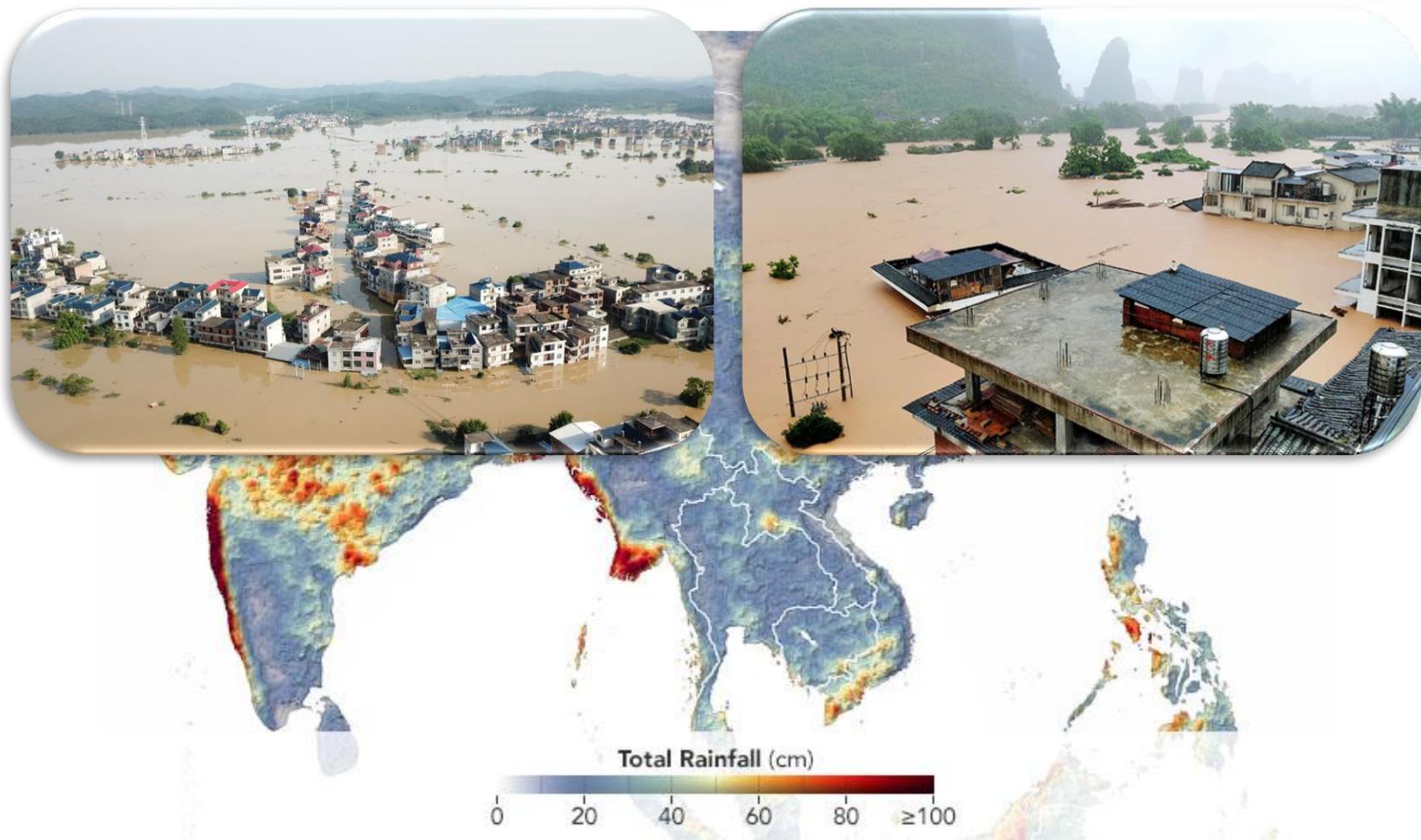
东亚季风与中国气候



郭正堂, 2017

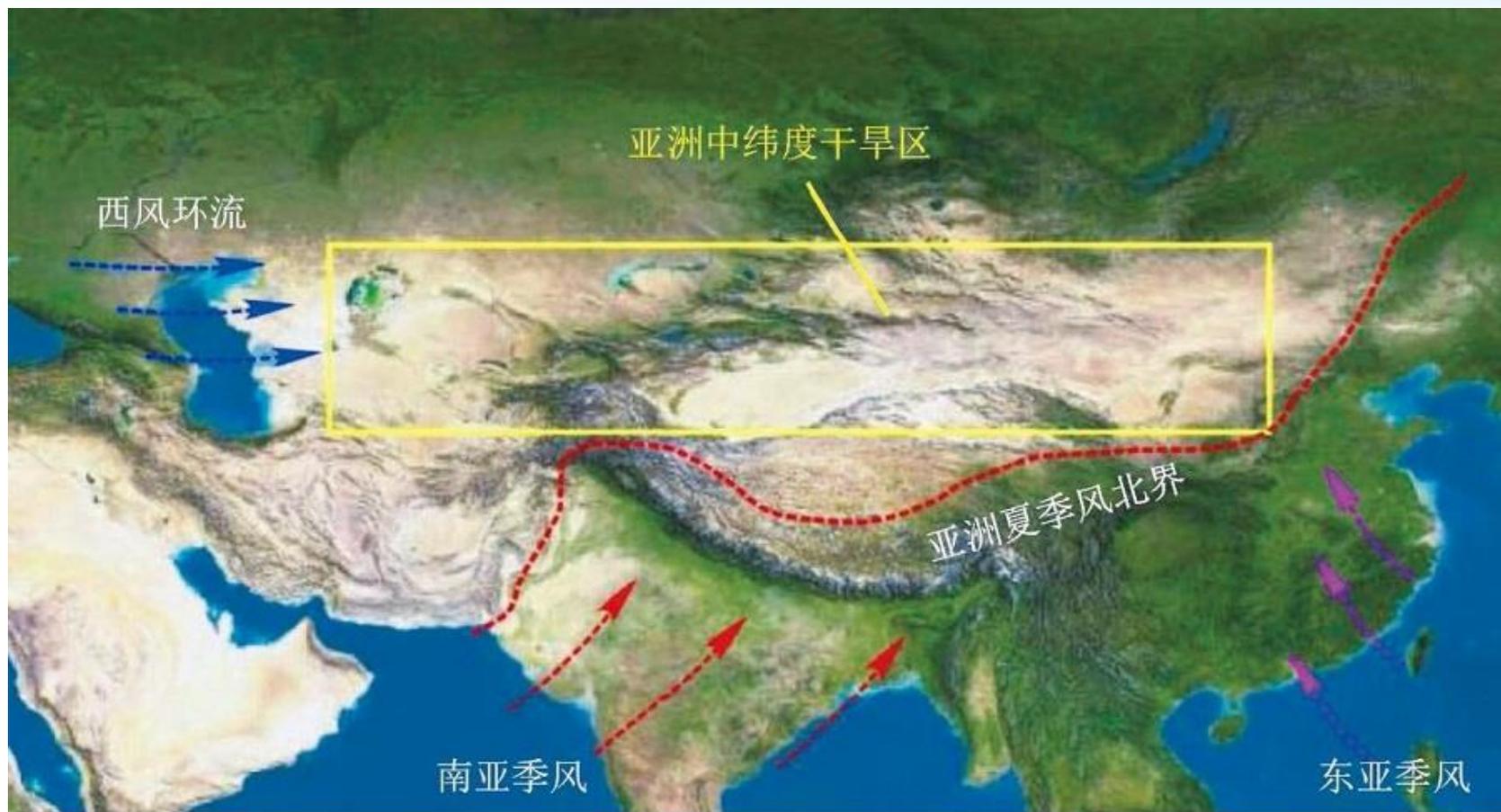
ICPP 2013

东亚季风降水与南方洪水



NASA Earth Observatory image by *Joshua Stevens*

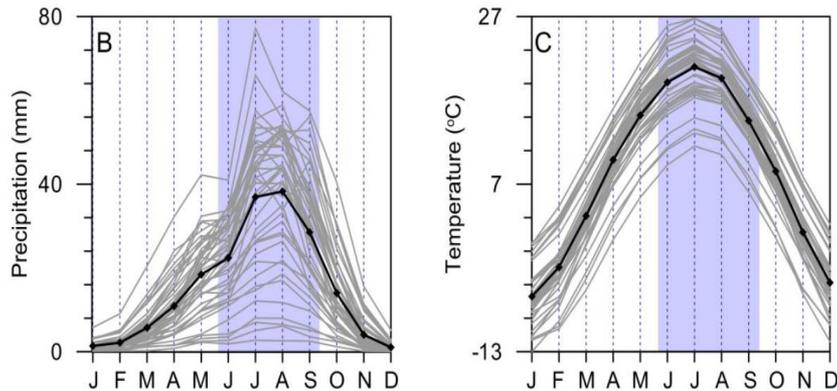
亚洲地区环境变化：东亚夏季风起源和演化



- ◆ 亚洲现代夏季风环境的起源与演化
- ◆ 与青藏高原生长和全球气候变化之间的联系

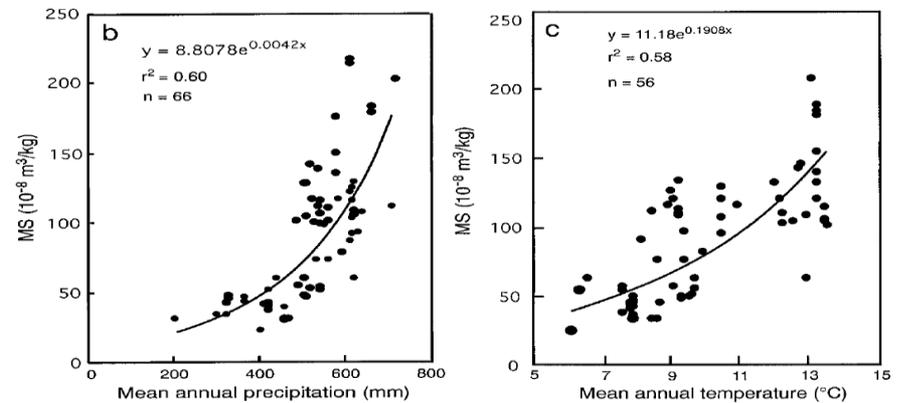
东亚夏季风指标

现代气候观测



<http://www.cma.gov.cn/>

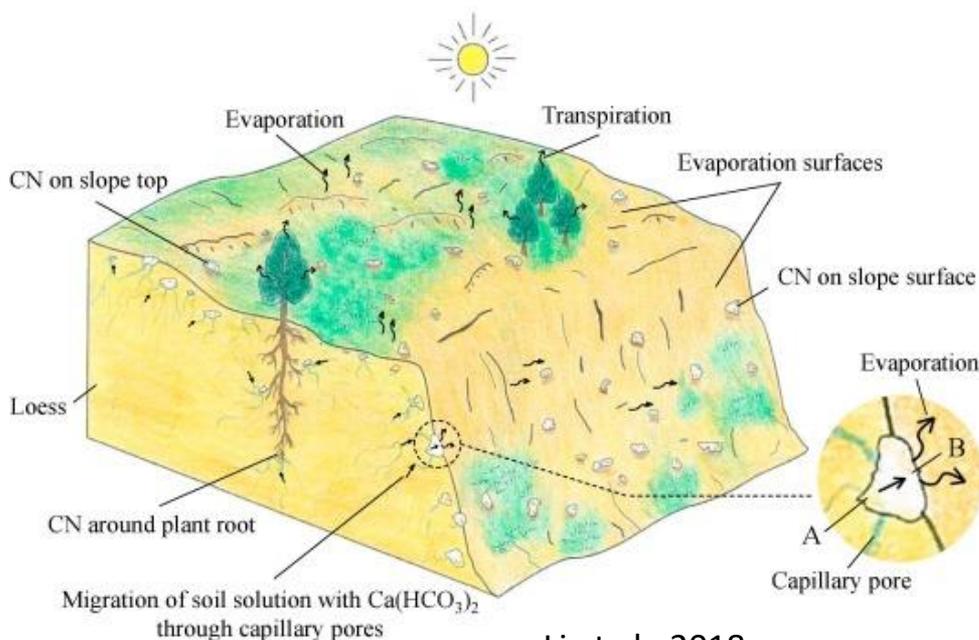
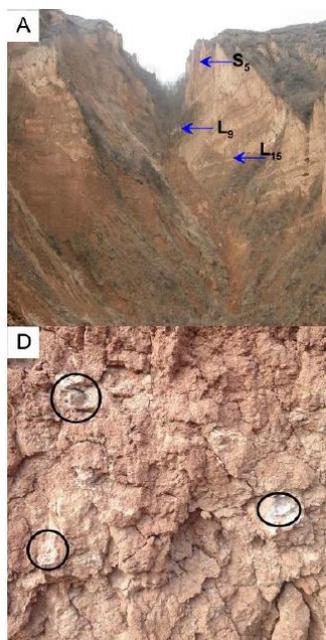
黄土磁化率



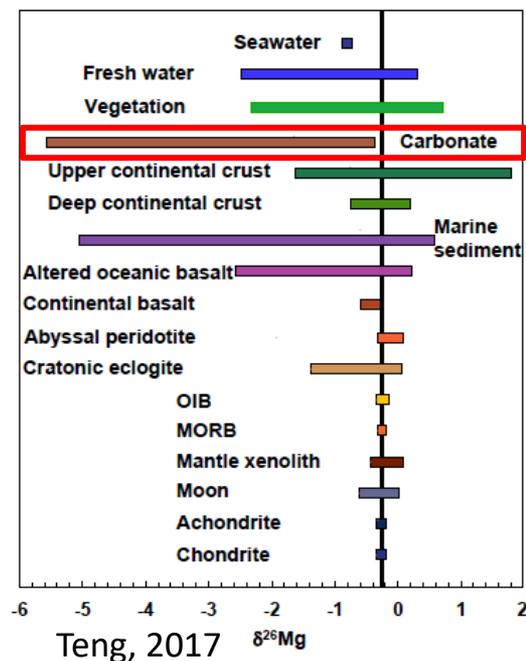
Porter & Hallet, 2001

- ◆ **现有指标：**难以有效单独分离夏季风降水的信号
容易受物源组成变化、风尘分选作用的影响

黄土次生碳酸盐Mg同位素示踪东亚夏季风

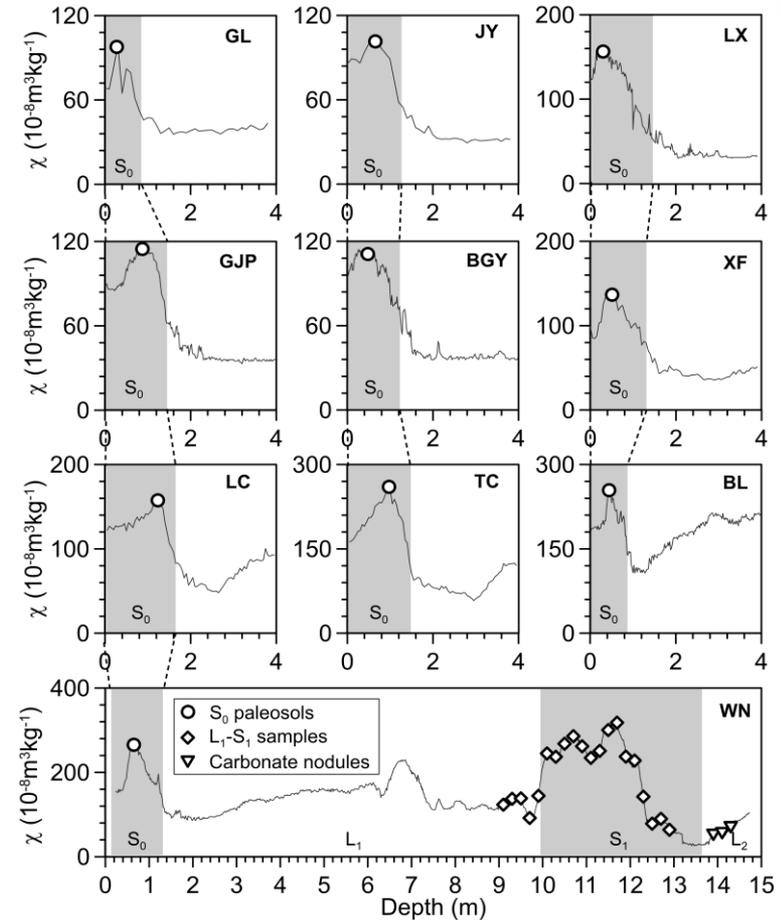
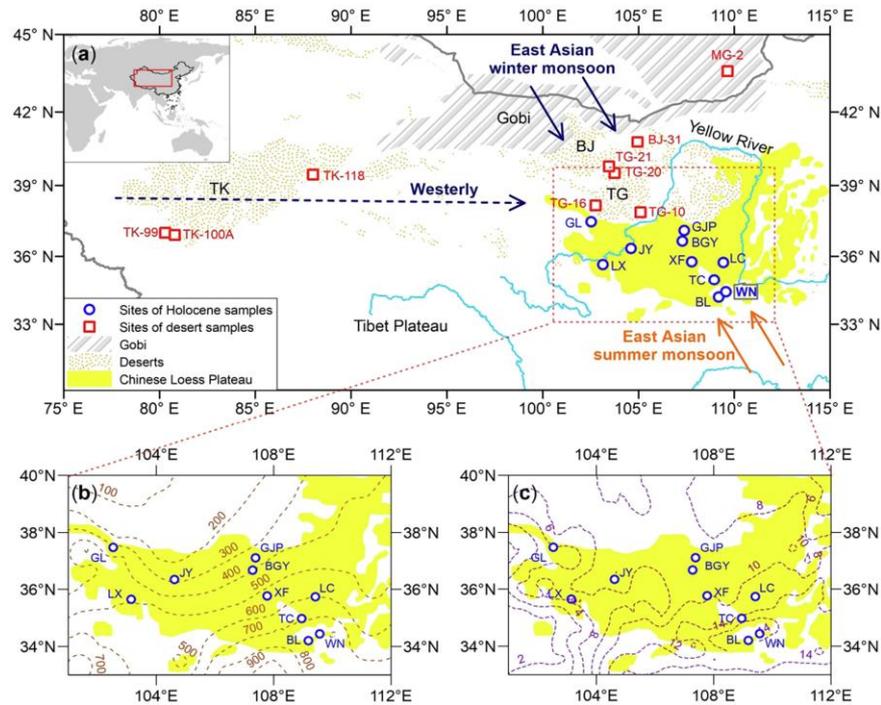


Li et al., 2018



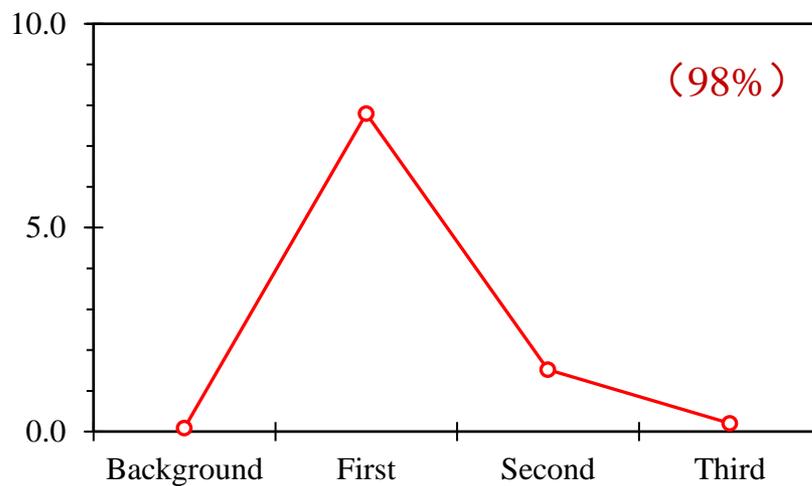
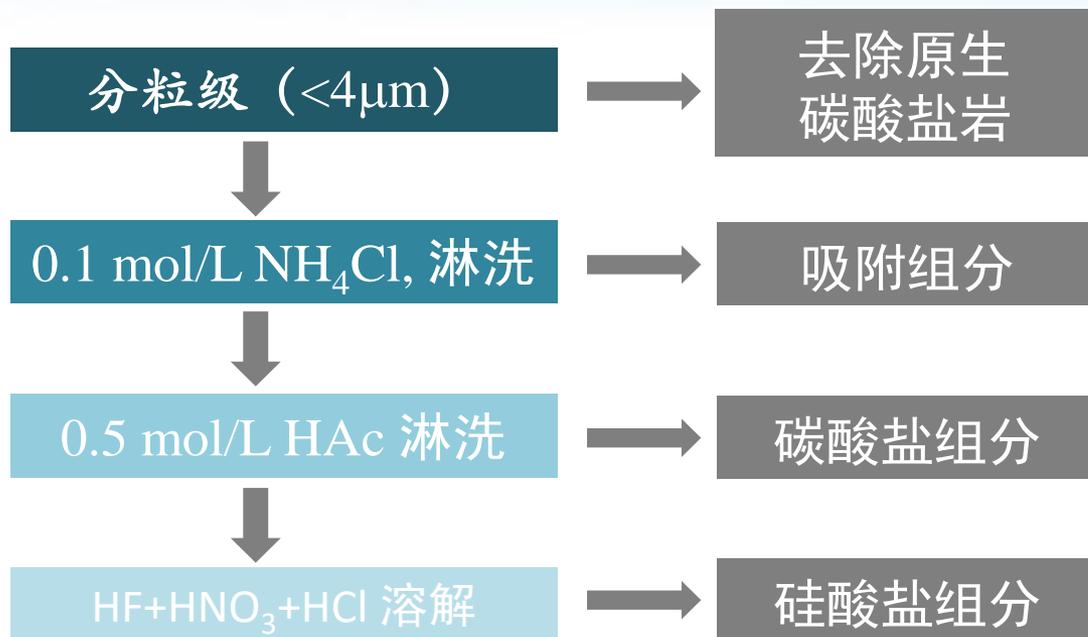
- ◆ 黄土次生碳酸盐是原生碳酸盐在成壤过程经历溶解再沉淀的产物
- ◆ 碳酸盐矿物形成过程Mg同位素分馏明显

研究材料

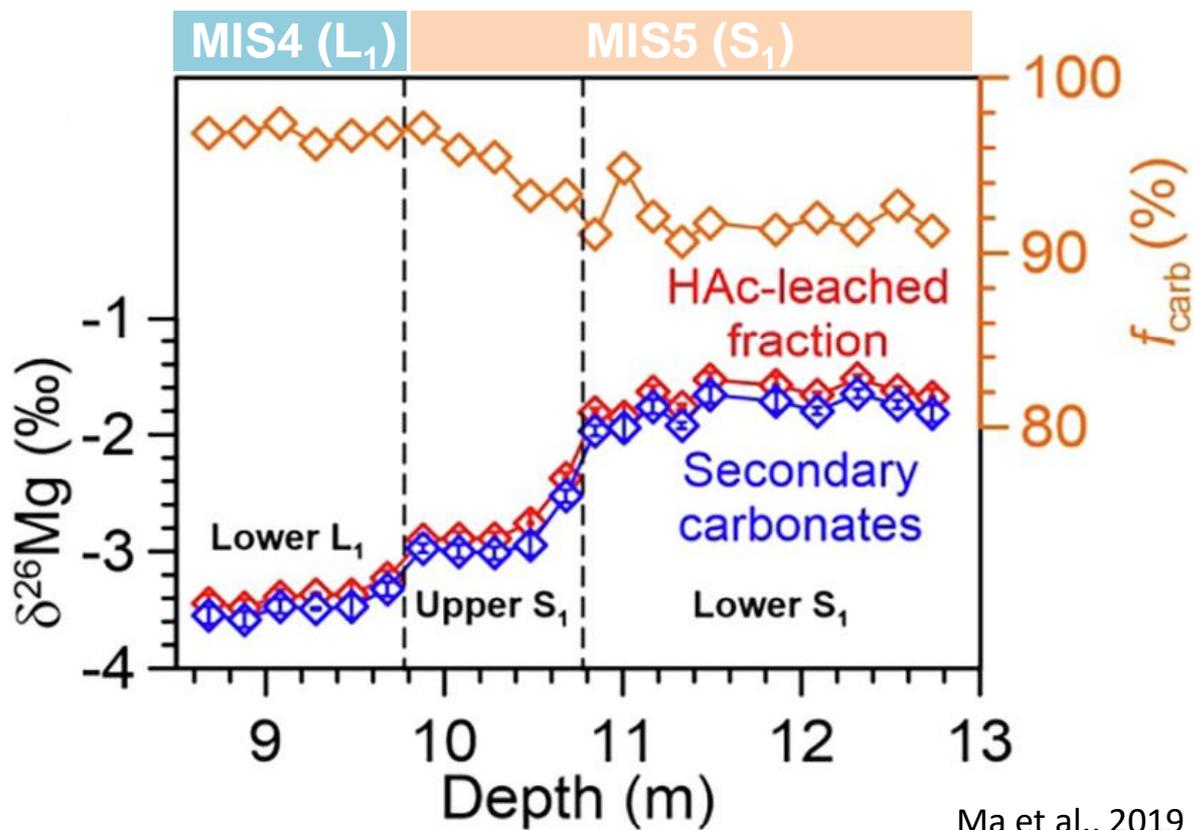


- ◆ 源区沙漠表土样品 (源区)
- ◆ 黄土高原空间全新世样品 (空间)
- ◆ 末次冰期-间冰期黄土-古土壤沉积序列 (时间)

实验方法

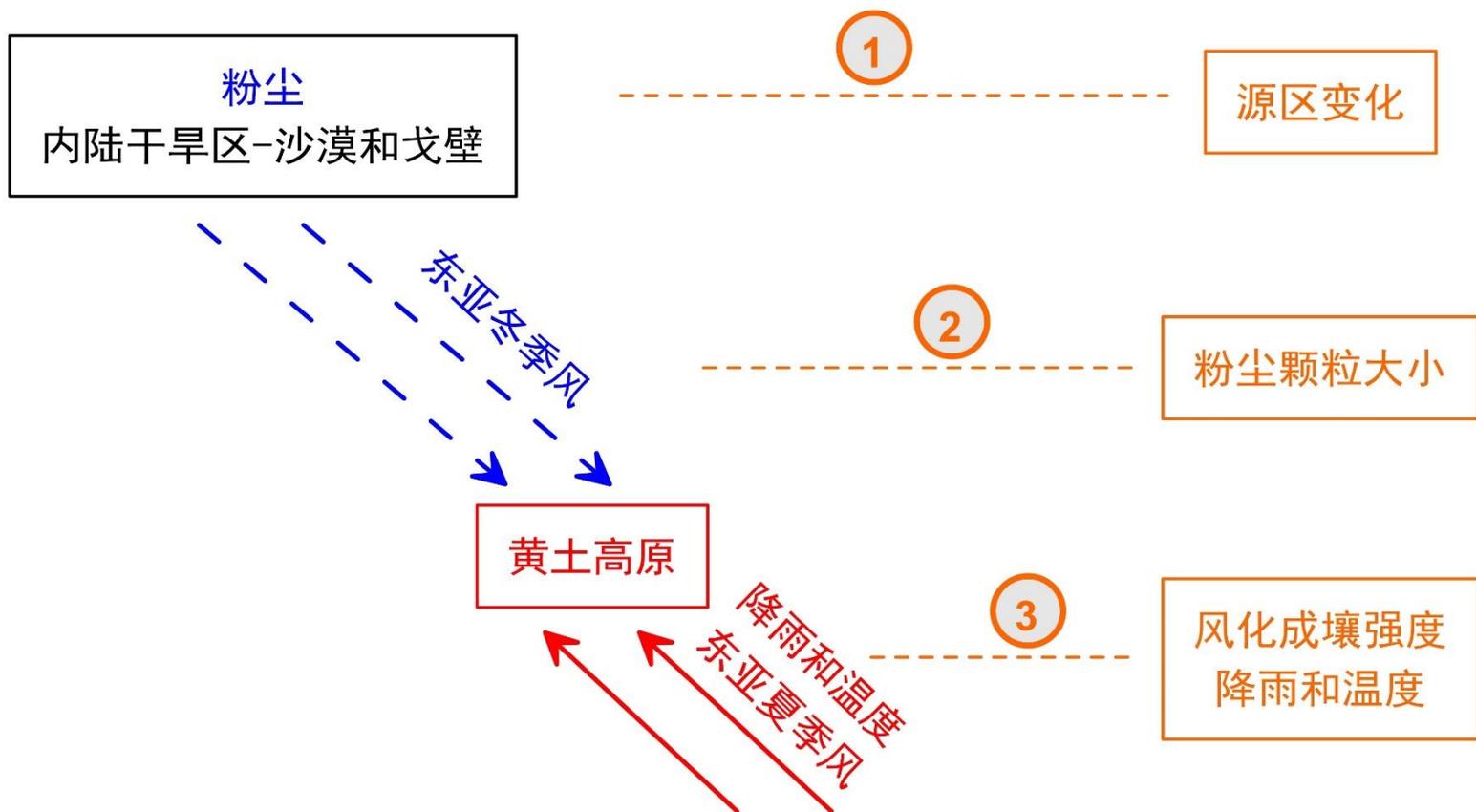


末次冰期-间冰期次生碳酸盐Mg同位素组成

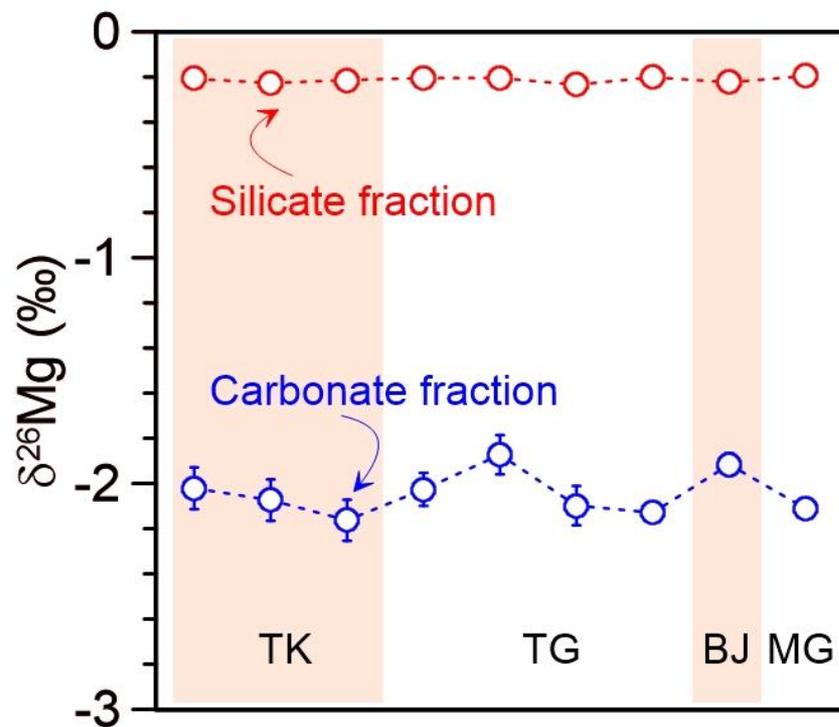


Ma et al., 2019

影响黄土物质组成的主要因素

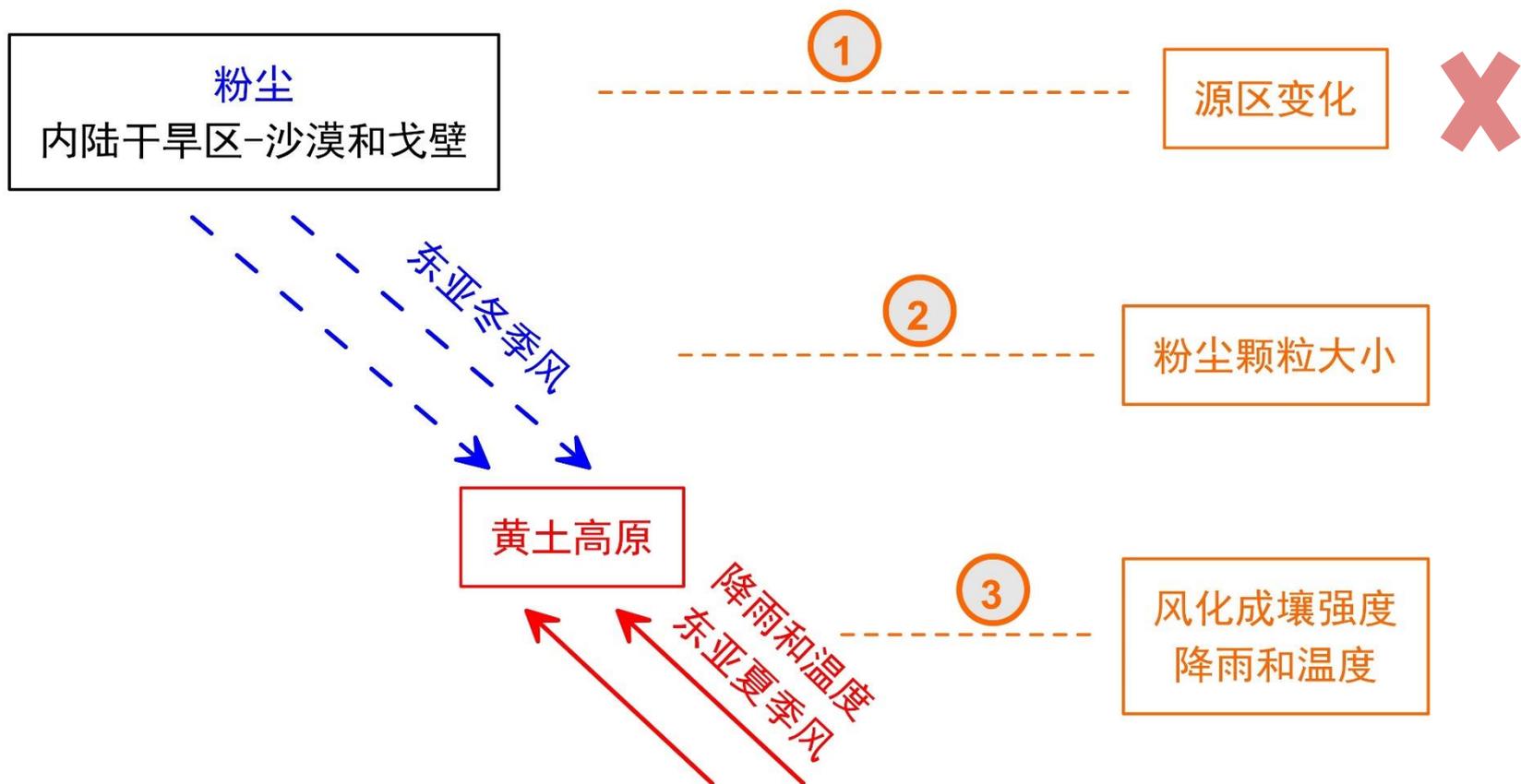


源区物质组成变化影响

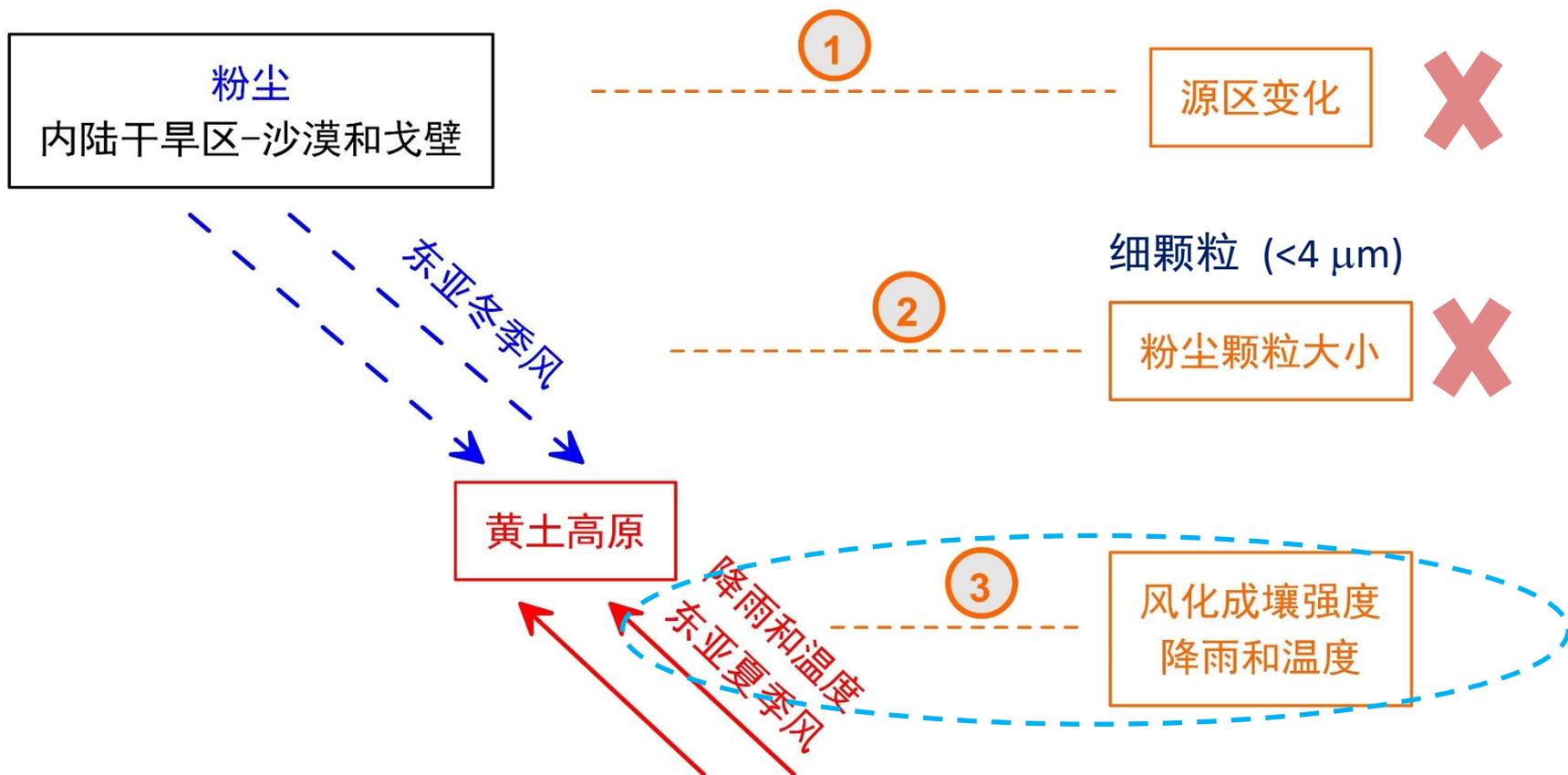


物源：原生碳酸盐的Mg同位素组成变化很小

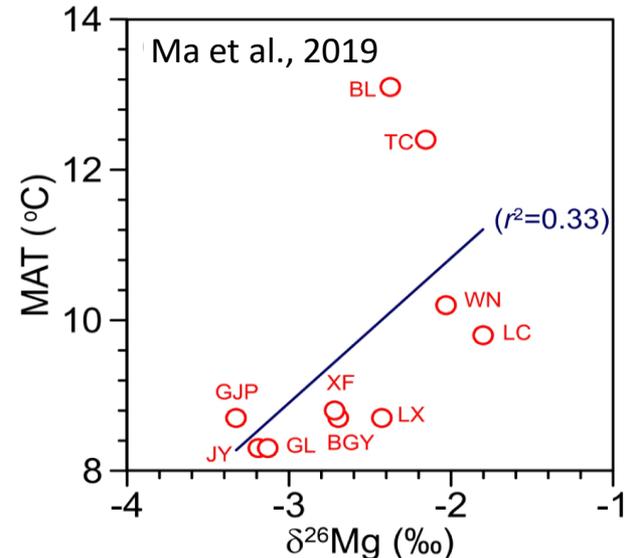
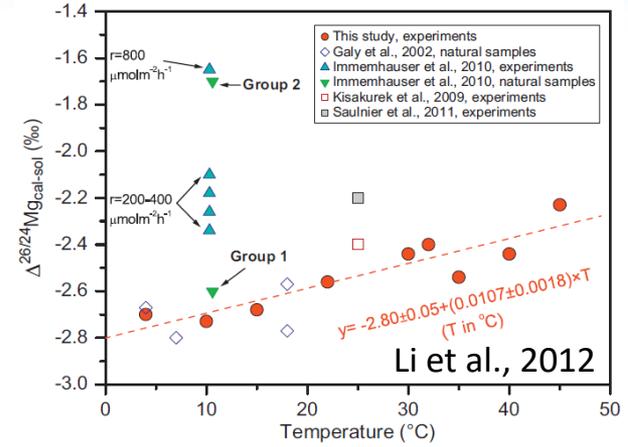
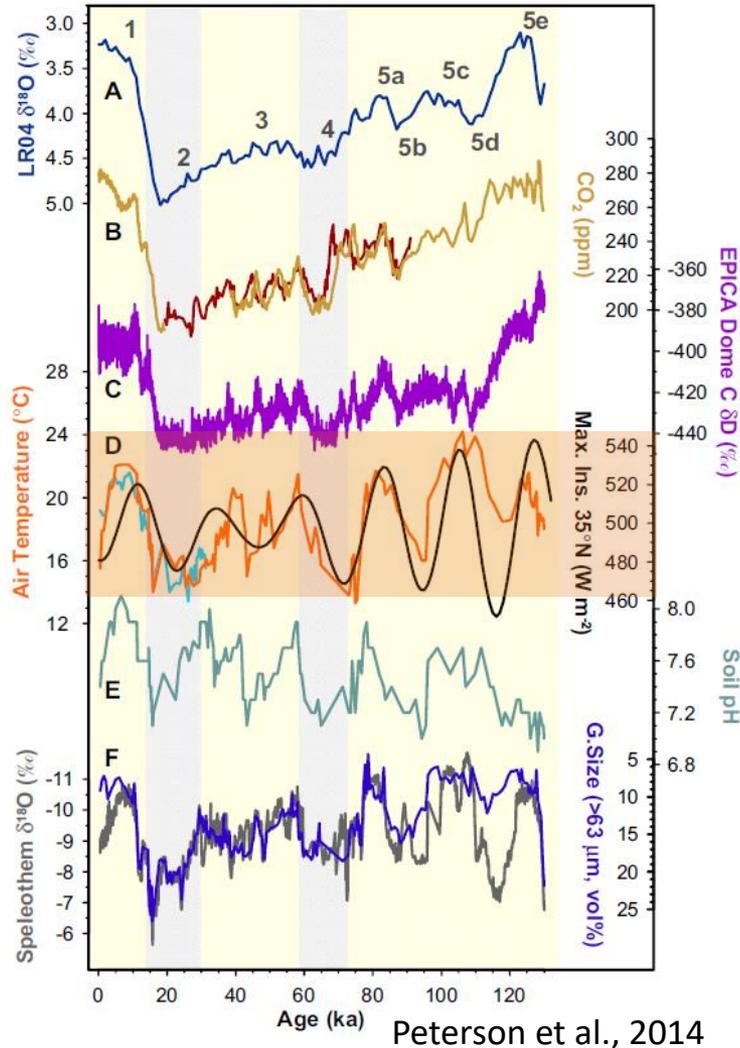
影响黄土物质组成的主要因素



影响黄土物质组成的主要因素

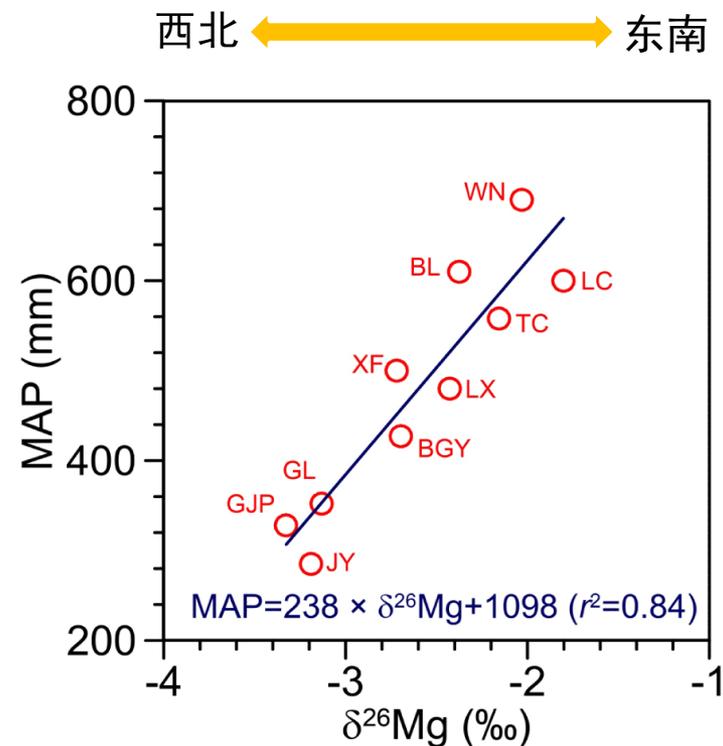
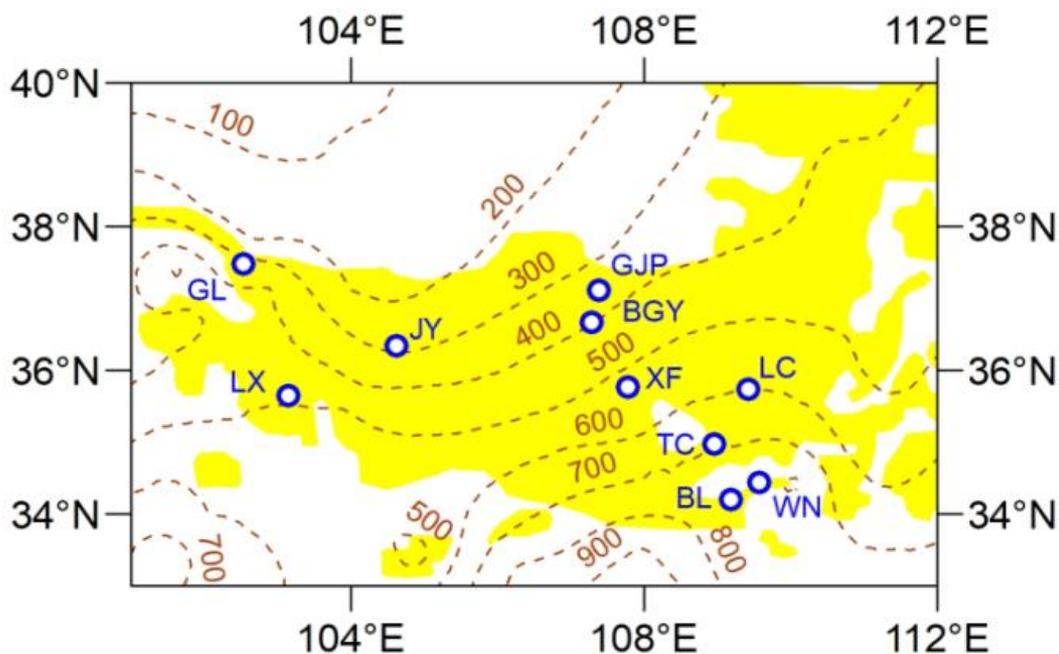


温度变化导致的影响有限



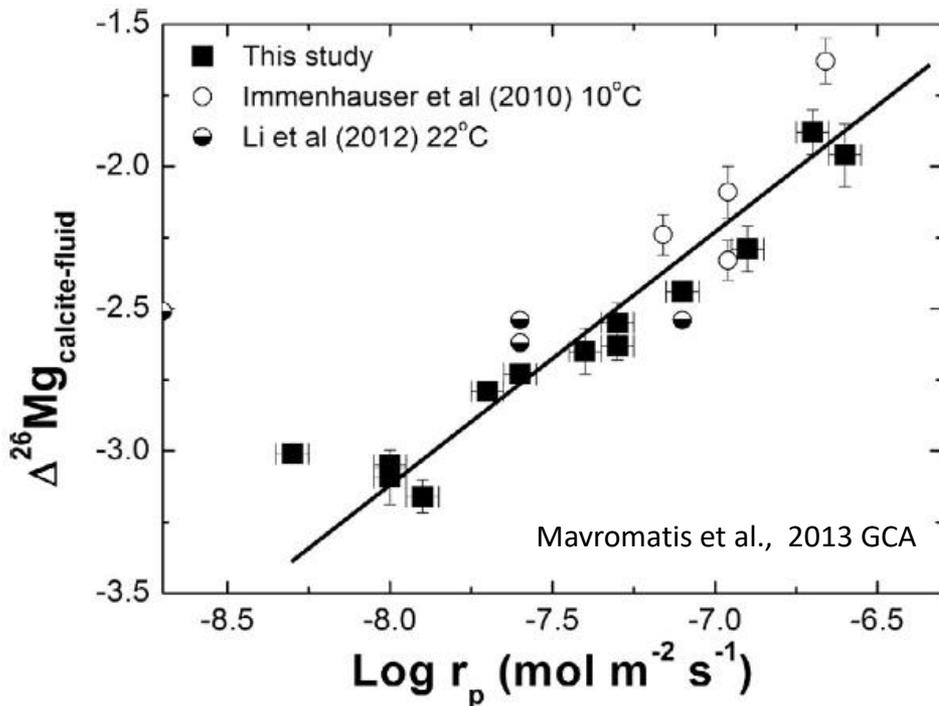
温度变化 < 10 °C, 导致 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值变化 < 0.1‰

降水变化可能是主要影响因素

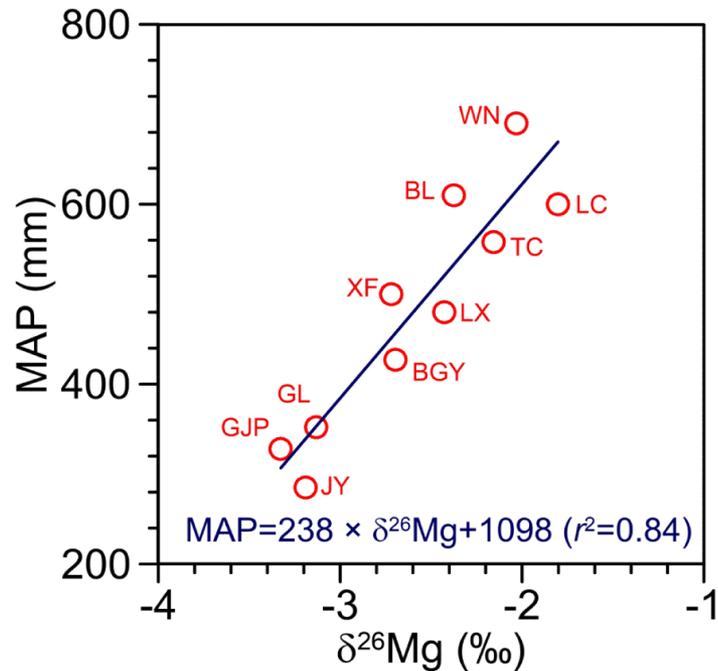


(i) 碳酸盐沉淀速率; (ii) Mg的迁移

(i) 碳酸盐沉淀速率



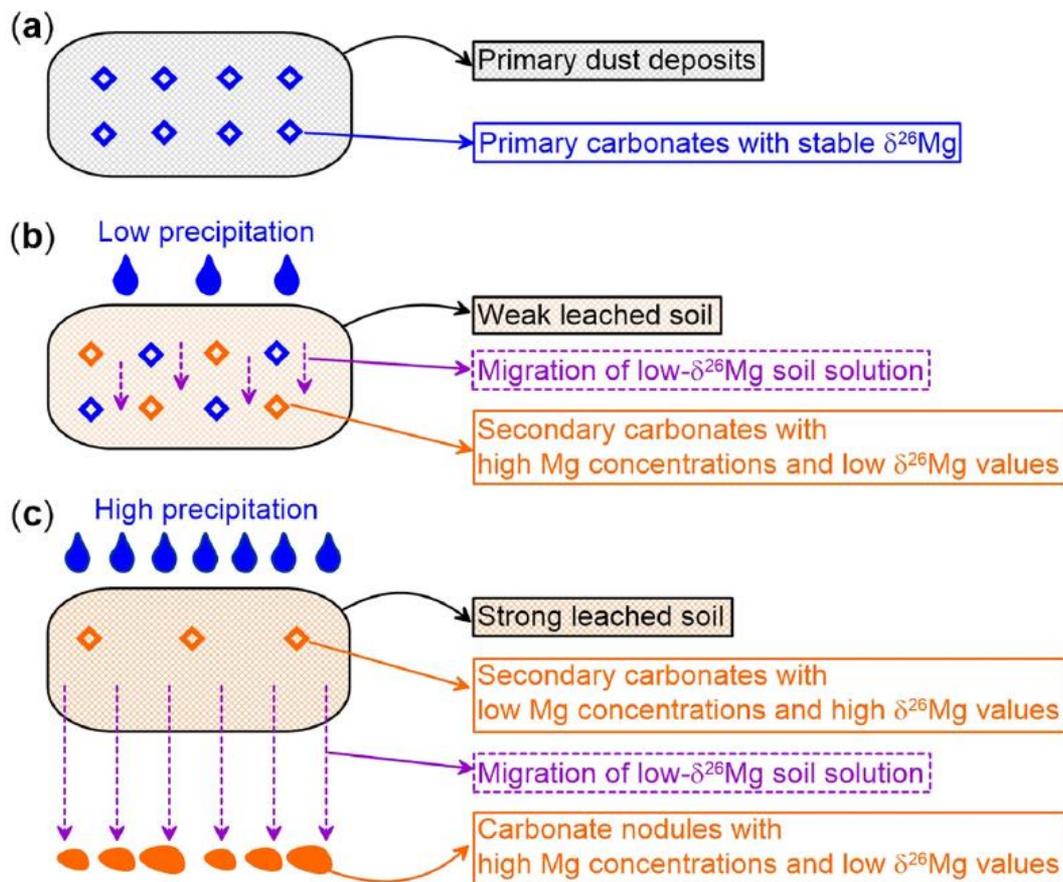
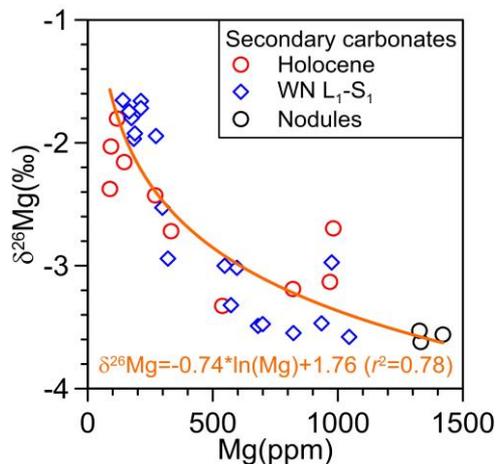
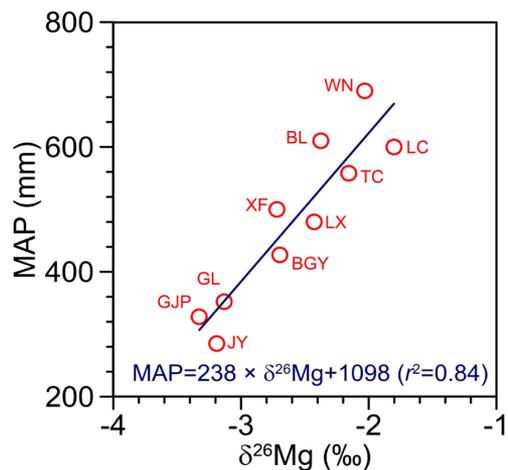
$\Delta^{26}\text{Mg}$ 与沉淀速率成正比



沉淀速率不是主要影响因素

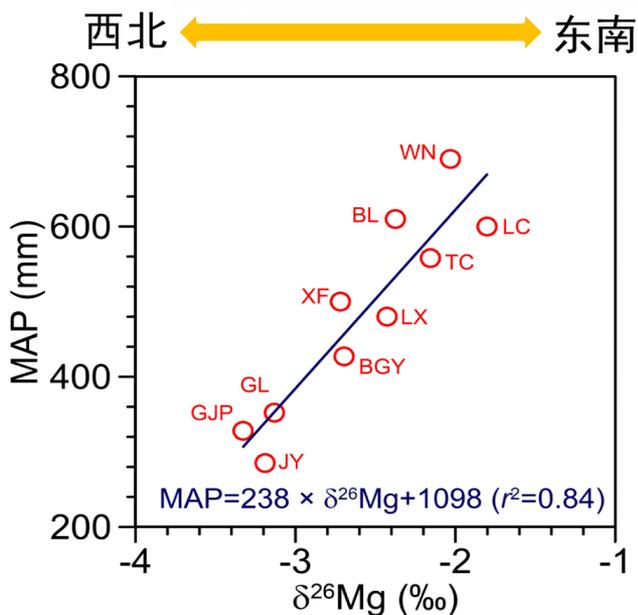
(ii) 轻Mg同位素优先迁移

西北 ←————→ 东南



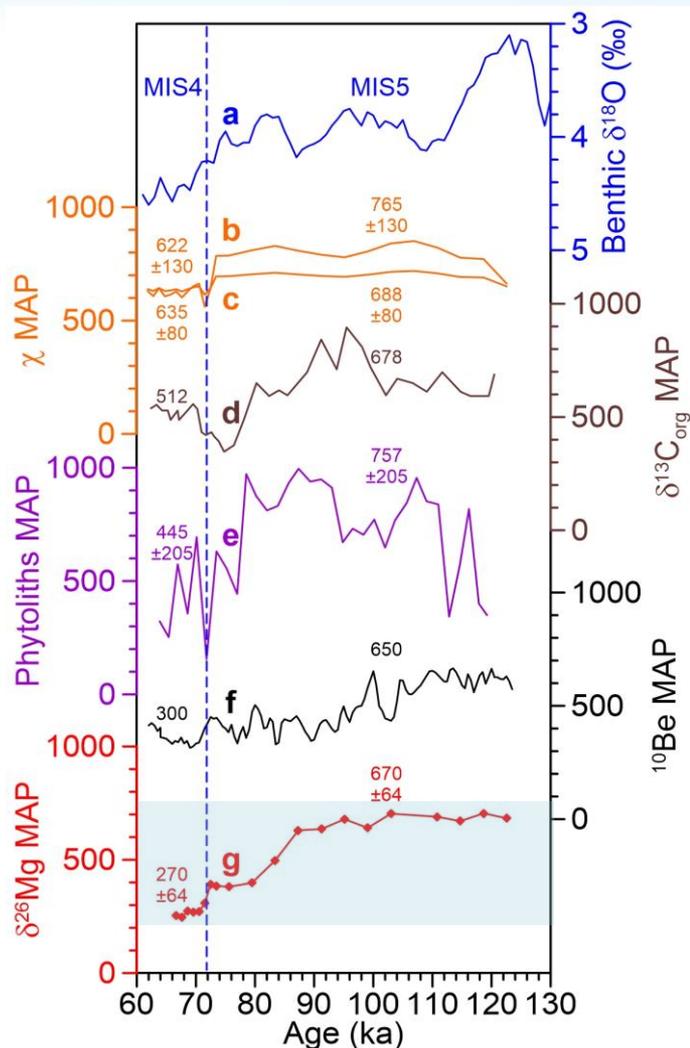
Ma et al., 2019

末次冰期-间冰期季风降水定量重建



优势:

1. 受温度影响较小
2. 误差较小 (53–76 mm)
3. 对降水变化敏感



Maher et al., 1994; Porter et al., 2001; Ning et al., 2008; Lu et al., 2007; Zhou et al., 2014

结论与展望

- 地球表层圈层镁同位素组成差异明显 ($\delta^{26}\text{Mg} = -5.5 \sim +1.8$) ;
- 大陆风化过程和洋壳低温蚀变过程导致镁同位素发生分馏，主要受矿物溶解、次生矿物形成等过程控制；
- 碳酸盐沉积过程镁同位素会发生显著分馏，主要受矿物相、温度、沉淀速率和生物效应等因素控制；
- 镁同位素可以用来示踪古风化作用和重建东亚季风降水；
- 镁同位素除了示踪古环境变化之外，还被应用到深部碳循环、海水化学演化、古生态重建、白云岩成因等研究，具有广阔的应用前景；

欢迎
提问

西北大学
NORTHWEST UNIVERSITY

西北大学博物馆