



陆相细粒沉积岩与古土壤深时气候分析方法综述

张鸿禹, 杨文涛

引用本文:

张鸿禹, 杨文涛. 陆相细粒沉积岩与古土壤深时气候分析方法综述[J]. 沉积学报, 2023, 41(2): 333-348.

ZHANG HongYu, YANG WenTao. Research Status of Deep-time Paleoclimate Analysis Methods for Terrestrial Pulverite and Paleosols[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(2): 333-348.

相似文献推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

滇中盆地南缘富锂黏土岩地球化学特征及沉积环境初探

Geochemical Characteristics and Sedimentary Environment of Li-rich Clay Rocks at the Southern Margin of the Central Yunnan Basin

沉积学报. 2023, 41(1): 170-182 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2021.076>

古环境、古气候分析对PT之交灭绝事件的启示

The Implications of a Paleoenvironment and Paleoclimate Analysis for the Permian-Triassic Mass Extinction: A case study of the Sunjiagou Formation in Jiyuan, western Henan province

沉积学报. 2023, 41(2): 392-408 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2021.122>

松辽盆地晚白垩世陆表古温度定量重建——以LD6-7井嫩江组一、二段为例

Quantitative Paleotemperature Reconstruction of Late Cretaceous Nenjiang Formation in Songliao Basin: A case study of the LD6/7 Core

沉积学报. 2020, 38(4): 759-770 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.079>

古土壤:沉积环境和古气候变化的灵敏指针

Paleosols: Sensitive Indicators of Depositional Environments and Paleoclimate

沉积学报. 2018, 36(3): 510-520 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.054>

化学蚀变指数指示古气候变化的适用性探讨

Applicability of Chemical Alteration Index to Indication of Paleoclimate Change by Different Sedimentary Facies

沉积学报. 2018, 36(2): 343-353 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.026>

陆相细粒沉积岩与古土壤深时气候分析方法综述

张鸿禹¹, 杨文涛^{1,2}

1. 河南理工大学资源环境学院, 河南焦作 454003

2. 中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心, 河南焦作 454003

摘要 深时古气候的恢复与分析, 对于预测未来气候的变化有非常重要的作用。陆相气候的恢复对于全球古气候带的划分、海陆气候差异的比较和气候模型的建立有重要的作用。气候敏感性沉积物的出现可以指示一定程度的气候信息。化学风化程度与气候密切相关, 越强烈的化学风化指示越温暖湿润的气候。泥岩化学风化程度的评价有基于地球化学特征建立的指数(CIA、WIP、CIW、PIA、钠亏损指数(τ_{Na}))和非常规稳定同位素特征, 还有基于泥岩矿物学特征的研究方法: 矿物成熟度、黏土矿物的含量及组合和磁性矿物的组成。湖泊沉积岩古气候分析方法有基于元素比值变化和基于高精度天文轨道周期性分析的古气候变化研究。通过古土壤可以根据其淀积层的埋深定量恢复古降水量; 黏土矿物、成土方解石、铁锰质结核和淀积层土壤基质的地球化学特征可以恢复古温度、古降水量和古大气二氧化碳浓度(pCO_2)。目前对陆相沉积岩和古土壤已经有了比较丰富的研究, 但未来还需要更多分辨率更高的陆相古气候分析方法建立和完善。

关键词 深时气候; 细粒沉积岩; 化学风化; 古土壤

第一作者简介 张鸿禹, 男, 1997年出生, 硕士研究生, 遗迹学与盆地分析, E-mail: 245921110@qq.com

通信作者 杨文涛, 男, 副教授, E-mail: ywtao125@163.com

中图分类号 P532 **文献标志码** A

0 引言

根据灾害流行病学研究中心的EM-DAT数据库^[1](2021)对1900—2020年发生的重大气候灾害事件的记录显示, 在全球范围内, 气候灾害事件正在不断增加, 代表气候变化的不断加剧。快速的气候变化将会把人类带向什么样的未来、是否会危及人类的生存是目前普遍被关注的问题。而对于未来气候的预测需要“以古鉴今”: 通过对深时古气候的研究来探索气候变化的规律、追寻气候变化的机制及响应等来揭示未来可能出现的气候变化。现今全球大气CO₂浓度达到415 mL/m³, 根据政府间气候变化委员会(IPCC)预测, 在21世纪末, 全球大气CO₂浓度将至少与始新世相当^[2]。因此以第四纪冰川为基础的气候机制已经不能满足对未来气候变化趋势的解读, 需要对更深时的气候进行研究^[3-4]。

目前国内外对于深时古气候已经做了大量的工作, 但大多数集中在海相地层中^[5-7], 对陆相地层的研究则相对较少。这主要是由于陆相地层定年材料相

对缺少并且地层连续性较差, 但陆相气候信息是古气候研究的重要内容。海相沉积序列恢复的连续的古温度主要来自双壳类、牙型石和有孔虫的氧同位素, 然而目前这些氧同位素的数据大部分来自古中低纬度地区, 即恢复的是热带—亚热带海洋表面温度, 对于全球平均温度的估算还需要陆相气候的相关信息^[8]。因此陆相气候在古气候研究中必不可少, 对陆相气候的研究可以划分全球古气候带, 可以比较古代海陆气候差异^[8-9], 可以建立气候模型^[10]来预测未来气候的强烈变化, 还可以将不同地质时代陆地生物的生存和演化与古气候的演变事件相结合^[11], 这与人类密切相关。陆相细粒沉积岩与古土壤是良好地分析陆相古气候的研究材料, 在其沉积时期, 不同的气候条件与地质营力的差异作用会形成不同的沉积物, 即气候信息会保存在其中。本文列举了目前广泛使用的陆相细粒沉积岩与古土壤古气候研究方法, 讨论了各分析方法的适用范围和需要避免的一些条件, 综合分析并给出针对陆相碎屑岩古气候研究建议。

1 气候敏感沉积物

1.1 陆相红层

陆相红层通常是因细小且分散的富含铁质氧化物的致色矿物(如赤铁矿等)在地层中广泛分布而使沉积岩或古土壤显示为红色^[12-13]。由于红层的红色主要来自矿物中铁离子的氧化,因此一些学者将红层与炎热干旱的气候条件相联系。如 Ziegler *et al.*^[14]认为志留纪红层代表极端氧化环境下的干旱气候;谭聪等^[12]对早三叠世红层研究认为早三叠世为炎热干旱的气候。但 Sheldon^[15]对 Cala Viola 地区晚二叠世古土壤红层古气候研究显示,当时气候温暖潮湿,并非干旱气候。这说明,红层并不能作为炎热干旱气候的标志,从热带森林气候到沙漠气候中都可能发育红层沉积。但如果在红层中伴随发育了钙质古土壤中常见的成土方解石和在滨海的地层中发育了石膏等蒸发盐,则该红层能够反映干旱的气候条件。此外,沉积物在埋藏过程中可能受到成岩作用的影响,使得氧化还原条件发生变化,从而地层颜色相应改变。因此,陆相红层并不能作为特征性沉积物以直接指示特定的气候条件。但近年对红层中两类赤铁矿(色素赤铁矿和碎屑赤铁矿)的识别与研究的不断深入,红层的古地磁特征已经能够反映良好的定年信息,可以为古气候研究提供基础资料^[16]。

1.2 风成沉积物

风成沉积物指受风力作用而形成的沉积物^[17]。风成沉积物在炎热和寒冷气候中都会发育,但都指示为干旱一半干旱气候。如 Zhu *et al.*^[18]在鄂尔多斯盆地早三叠世地层中识别的风成沉积物代表了二叠

纪—三叠纪交界时期的炎热干旱气候;Mountney *et al.*^[19]在冰岛 Askja 地区对风力沉积砂床的研究显示,该地区风成沉积在寒冷干旱一半干旱气候条件下发育。风成砂丘除了能作为干旱环境的指示对象,还是恢复古风向的重要研究材料,风成砂丘在风力作用下会不断发生迁移从而形成大型的倾斜层理,用倾斜层理恢复的砂丘的移动方向就是古风向^[20-21]。大气环流是控制气候变化的重要因素,因此古风向的研究也是陆相古气候研究的一个重要内容。

1.3 煤

煤是植物经过成煤作用而生成的一种矿产。煤的出现指示的是一种潮湿的气候环境,只有在潮湿气候下植物才大量繁盛^[22]。但在热带—亚热带和温带气候中都会发育煤,进一步判断沉积环境要结合更细致的研究。此外还可以根据煤的亮暗指数(BDI)、镜质组与惰质组的比(V/I)和凝胶化指数(GI)等煤岩参数来反映气候变化情况^[23],惰质组中记录的森林野火事件也能恢复古大气氧的含量^[24]。

2 细粒沉积岩化学风化程度

2.1 地球化学特征

碎屑岩中泥岩的地球化学特征,受到母岩成分以及风化产物的化学特征综合控制。化学风化是指溶解了大气中CO₂的雨水与风化剖面发生的水解反应^[25],经过中和作用生成次生矿物、黏土矿物和溶解盐^[26-27]。化学风化作用与大气CO₂浓度和降水量有关,越强烈的化学风化作用代表越温暖潮湿的气候。目前已经有研究者提出了各种化学风化指数来识别风化程度(表1)。

表1 化学风化指数

Table 1 Chemical weathering indexes

化学风化指数	迁移元素	不迁移元素	
$CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + K_2O + Na_2O) \times 100\%$	K, Ca, Na	Al	(1)
$\ln[(CaO^* + Na_2O) / Al_2O_3]$	Ca, Na	Al	(2)
$\ln(Al_2O_3 / Na_2O)$	Na		(3)
$WIP = \left[\left(\frac{2Na_2O}{0.35} \right) + \left(\frac{MgO}{0.9} \right) + \left(\frac{2K_2O}{0.25} \right) + \left(\frac{CaO^*}{0.7} \right) \right] \times 100\%$	K, Ca, Na, Mg		(4)
$CIW = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O) \times 100\%$	Ca, Na	Al	(5)
$PIA = (Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O) \times 100\%$	Ca, Na	Al	(6)
$\tau_{Na} = \frac{Na_{soil}}{Na_{protolith}} \times \frac{Zr_{protolith}}{Zr_{soil}} - 1$	Na	Zr	(7)
Rb/Sr	Sr	Rb	(8)
Th/U	U	Th	(9)

注:式中用于计算的单位均为摩尔数;CaO*仅指硅酸岩中的CaO。

化学风化指数普遍是根据风化过程中不迁移元素相对迁移元素的富集而建立。迁移元素的确定是根据元素的离子势(IP, 离子电荷与离子半径之间的比值)^[28]。当离子势低于3, 该元素与氧形成弱键, 在风化过程中会被优先释放。因此常量元素中的K、Ca、Na在化学风化指数中视作迁移元素(图1a)。

Nesbitt *et al.*^[25,27]根据矿物的热力学性质以及实验室内模拟风化的实验, 选择Al作为不可移动元素, 提出上地壳的化学风化可以根据Al₂O₃-(CaO⁺+Na₂O)-K₂O系统(A-CN-K系统, 图1b)来显示。其在该系统中预计了化学风化趋势线, 风化趋势与其在Toorong盆地实测的各化学风化过程相吻合。

CIA (Chemical Index of Interaction, 式1)与A-CN-K系统相对应, CIA的取值范围通常在50~100, 当CIA为50, 表示几乎未发生化学风化作用, CIA值越高表示可迁移元素在风化剖面中流失程度越高^[29-30]。在不同气候条件下CIA值明显不同, CIA值越大指示的气候条件越温暖湿润, 反之则相对寒冷^[31]。最新的研究结果表明, CIA对冰期向间冰期的气候转化能够较好的评价和响应^[32]。并且对现代河流沉积物的分析显示, CIA会随地表温度变化而相应改变^[33], Yang *et al.*^[34]基于此结论建立了CIA与温度的拟合函数:

$$MAT = 0.56CIA - 25.7 \quad (10)$$

式中: MAT为年均温度, 单位为℃, R²=0.5。Yang *et al.*^[34]将其用于二叠纪温度纬度梯度的研究。曹莹^[35]将该公式用于华北二叠纪—三叠纪之交时期的古温度变化的研究, 结果显示年均温度在该时期明显上升了约8.2℃, 该研究结论与普遍认识的二叠纪末升

温结论相吻合。

CIA也存在一定的局限性, 沉积分异、沉积再旋回、成岩作用和对硅酸盐中钙的校正误差等因素都会对岩石的CIA值造成影响^[24]。沉积分异作用导致的悬浮筛选使得不同粒径的沉积物矿物组成出现分异, 细粒黏土物质的相对富集会使得CIA值偏高^[31,36]。沉积再旋回作用会使沉积物质继承前一个旋回的物质风化信息^[37], 因此在使用CIA分析化学风化作用前要先识别地层是否存在沉积再旋回作用。

由于存在再旋回作用的母岩的风化程度与CIA不具有良好的线性关系, 部分学者提出了新的风化指数来评价非均质母岩的化学风化作用。von Eynatten *et al.*^[38]提出用ln((CaO⁺+Na₂O)/Al₂O₃)和ln(Al₂O₃/Na₂O)两种指标来替代CIA, 如果指标计算为高值则反映强降水、强的大陆径流和温暖气候下的强化学风化作用。Price *et al.*^[39]、Parker^[40]提出的WIP (Weathering Index of Parker's, 式4)可以被用于各种岩性的风化剖面间的比较。WIP值越低表示越强烈的化学风化作用, 代表气候更加温暖湿润。

在成岩作用的影响中, 钾交代作用是最常被考虑的过程, 钾交代作用会使得计算的风化程度偏低^[41]。在对CIA分析前, 可以结合A-CN-K三角图^[27](图2a)和镜下特征来识别钾交代作用, 也可以根据Panahi *et al.*^[43]提出的校正公式对K₂O值进行修正。Harnois^[44]提出可以用CIW (Chemical Index of Weathering, 式5)来避免钾在风化剖面中的不同行为。CIW值越高, 反映的物源区古气候越趋向于温暖潮湿。但Fedot *et al.*^[42]指出CIW仅去掉了K₂O, 这种简单的转变没有考

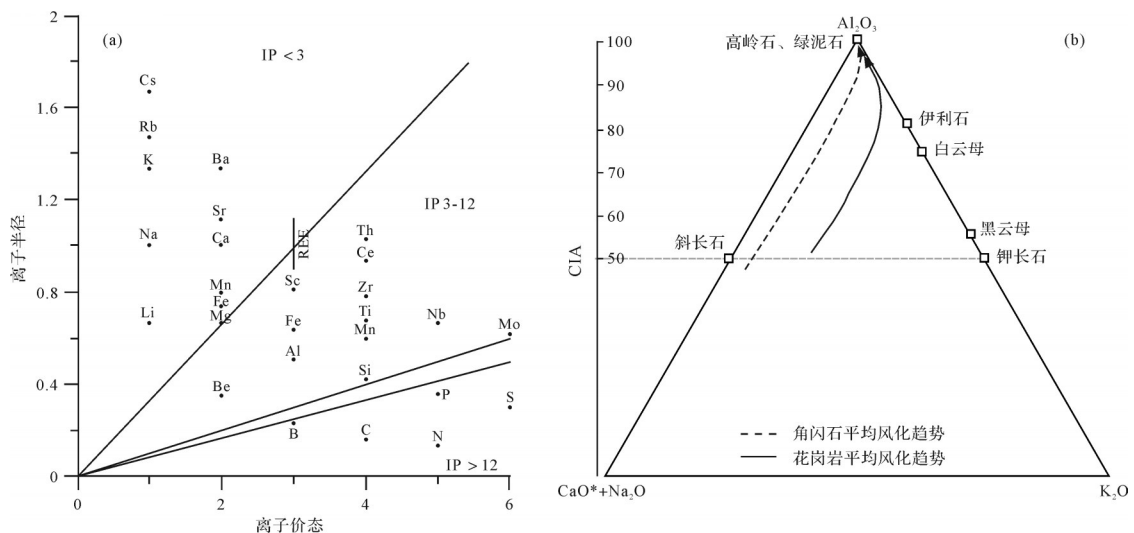


图1 (a)不同离子的离子势(修改自Bugge *et al.*^[28]); (b)A-CN-K三角图

Fig.1 (a)The ionic potential (IP) of the different elements (modified from Bugge *et al.*^[28]); (b)A-CN-K triangle chart

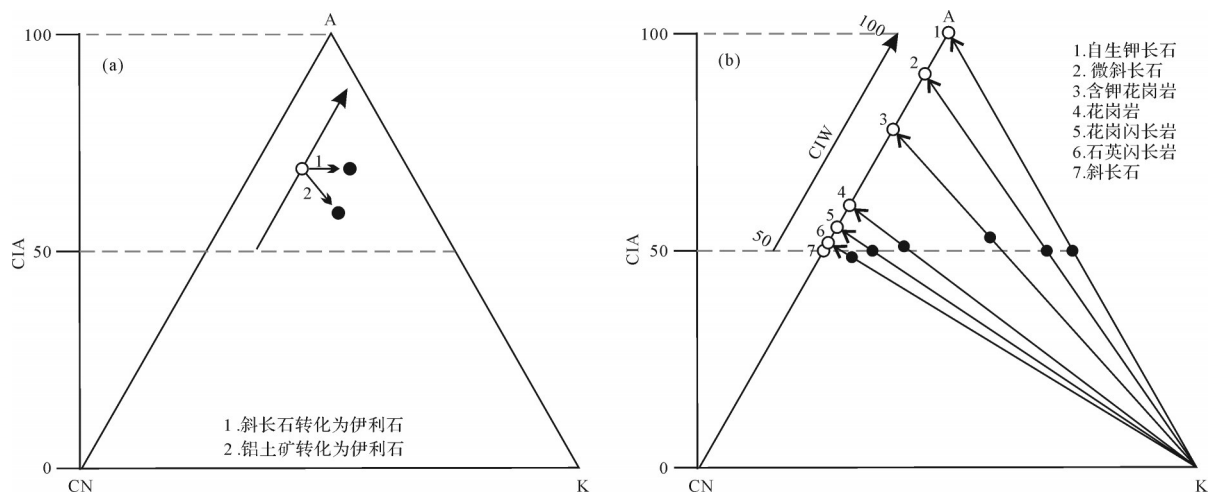


图2 (a) 钾交代作用示意图(修改自 Fedo *et al.*^[42]); (b) 含钾矿物对 CIW 的影响示意图(修改自 Fedo *et al.*^[42])

Fig.2 (a) Potassium metasomatism show in A-CN-K triangle chart (modified from Fedo *et al.*^[42]);

(b) different potassium minerals show in A-CN-K triangle chart (modified from Fedo *et al.*^[42])

考虑钾长石中的 Al 元素,对于物源区母岩中富含钾长石的样品而言,无论是否经历风化作用,CIW 计算值都会很高(图 2b)。Fedo *et al.*^[42]提出了需要单独控制的风化指数 PIA (Plagioclase Index of Alteration, 式 6)。PIA 值与 CIA 类似,新鲜岩石 PIA 值为 50,对指示更加温暖湿润气候条件下的风化产物,其 PIA 显示高值。

所有化学风化指数中用于计算的 CaO^* ,均指硅酸岩中的 CaO,即需要对泥岩测定所得到的 CaO 进行校正,去除碳酸盐和磷酸盐提供的 CaO。由于 Ca 的校正可能存在一定的误差,因此对于花岗岩基岩的风化可以选用 Na 亏损指数(τ_{Na} , 式 7)来避免对钙元素的使用。Na 元素几乎不受次生矿物表面吸附和土壤生物活动的影响,所以选用 Na 亏损指数可以较好地约束地表化学风化强度^[44-45]。但 Na 亏损指数使用时要注意再旋回作用和分选作用对石英和锆石的富集。Yang *et al.*^[46]对现代非冰川作用影响的花岗岩基质的土壤的化学风化数据的统计分析,将陆表年均温度(MAT)与 Na 亏损指数建立了一个线性相关的经验公式($R^2=0.84$):

$$MAT = -24.2\tau_{Na} - 0.9 \quad (11)$$

式中:MAT 为年均温度,单位为 $^{\circ}C$ 。Yang *et al.*^[46]利用该式计算得到华北南缘晚萨克马尔期的陆表年均温约为 $20^{\circ}C$ 。Qi *et al.*^[47]将该式用于华南马里诺冰期的研究,显示在该冰期前后,年均温为 $20^{\circ}C \pm 5.4^{\circ}C$ 。

以上各种风化指数的建立都是基于主量元素分析,微量元素由于离子势不同也会存在活性差异。如在风化产物中 Rb/Sr 的高值表示强的化学风化, Sr 离子半径较小较易流失,而 Rb 元素的离子半径较大

从而易被黏土吸附在离母岩区较近的位置,或存在于风化产物之中^[48-49]。Th 和 U 的行为与 Rb 和 Sr 类似, Th 元素大部分被细粒沉积物吸附保留在原地^[50], 源区的 U 元素出露地表后 U^{4+} 逐渐氧化成 U^{6+} , 在温暖湿润的气候下会被水体带走。但两种指数在解释时会存在一定的歧义: Sr 的行为与 Ca 相似^[28], 在湖泊相中, 盐度相对升高会使水体中大量溶解的 Sr^{2+} 有沉淀趋势; 易溶于水的 U^{6+} 在湖泊内还原环境下会被还原成 U^{4+} , 易被黏土矿物或有机质吸附而沉淀富集^[51-52]。两者与沉积环境、盐度、氧化还原等条件有一定的关系, 因此本文认为 Th/U 与 Rb/Sr 应该只适用于风化剖面, 而并不适合通过泥岩解释化学风化程度。

除了常规的涉及地球化学元素能反应化学风化程度外, 最新研究显示部分非常规稳定同位素也有指示风化作用的潜力。Li *et al.*^[53]对现今主要河流的钾同位素研究显示, 在硅酸盐化学风化过程中, 钾同位素会发生分馏, 重的钾同位素(^{41}K)优先被分配到水溶液中^[54]。锂同位素与钾同位素有着相同的特征, 在风化过程中, 重锂同位素(7Li)会释放到水中, 而轻锂同位素则易被黏土吸附保留在风化产物中^[55]。而镁同位素的分馏则是更重的镁同位素会残留在风化残余物中^[56]。几种同位素在地层中的变化曲线可以揭示化学风化的波动。

2.2 矿物特征

对沉积岩碎屑组分的分析也能够提取风化信息。长石(F)通常易风化, 在温暖潮湿环境中不易保存; 而石英(Q)抗风化能力强, 易保存下来。因此 F/Q 比值能评估风化强度, 其数值越大表示风化程度越

弱,这对应更加干冷的气候特征^[57-59]。F/Q 在大洋钻探岩心分析中被用于分析不同层位的母岩风化程度与相应的气候信息^[60]。但该指数受构造作用影响较大,实际使用时要对地质背景有一定的了解。

黏土矿物通常在表生风化壳中由风化产生,因此黏土矿物可以用来指示风化程度和气候特征。在地层中黏土矿物都是组合出现,不同的组合和相对含量的变化是解释气候变化的主要依据。高岭石是由长石、云母和辉石强烈淋滤形成^[61],通常形成在温暖潮湿的高化学风化气候条件下。蒙脱石易在干湿交替的气候条件下形成^[62],即在季风气候和干旱气候的强季节性降水的环境下蒙脱石容易形成^[63]。Robert^[64]认为蒙脱石可以作为区域降水量的指示特征,在半干旱地区蒙脱石有较高的结晶度。Jiménez-Espinosa *et al.*^[65]也指出与赤铁矿共生的蒙脱石会指示半干旱的气候条件。伊利石形成于寒冷少雨的气候条件下^[66-67],如果气候进一步变得湿热,伊利石会被分解为高岭石。绿泥石在氧化条件下并不稳定^[68],通常只能在化学风化作用受抑制的地区保存^[61]。通常认为绿泥石和伊利石在风化剖面中含量的相对增加表示气候逐渐干旱。蛭石在温暖潮湿但排水较差的环境中形成。坡缕石形成于干旱、半干旱气候条件^[66]。除了每种黏土矿物能指代不同的气候条件,一些黏土矿物含量的比值也可以作为风化指数来衡量化学风化程度,如蒙脱石/伊利石比值、黏土矿物/石英比值、伊利石化学指数等,这些指数的更高值能表示更强的化学风化程度^[69]。

对黏土矿物指示的气候分析要注意非气候因素的影响。Chamley^[70]对海洋黏土沉积物的分析总结出,不同的搬运介质,不同地区的侵蚀作用、粒度分异和凝聚作用等是影响黏土矿物形成和分布的非气候因素。分异作用主要是由于黏土矿物颗粒细小,对水动力作用敏感,在细粒沉积物中富集。凝聚作用则是不同的黏土颗粒在盐溶液中有不同的凝聚速度,这会影响到黏土矿物的分布^[71]。成岩作用也是影响黏土矿物组成的重要因素。但对成岩作用的识别可以通过结晶度是否存在有规律的变化趋势和显微镜下的形态来识别^[67]。

磁性矿物的生成、运移和保存等过程与气候密切相关,如赤铁矿通常代表炎热干旱的气候条件而针铁矿对应的是温冷的气候条件^[72-73]。对磁性矿物的研究可以借助环境磁学的一些参数,磁滞回线和

磁化强度随温度变化曲线(M-T)是识别磁性矿物含量和种类的良好方法。此外,磁性矿物颗粒的大小也是环境磁学研究中的一个重要方面。非磁滞剩磁(χ_{ARM})以及 χ_{ARM}/χ 可以反映磁性矿物的颗粒大小^[74]。

3 湖泊沉积岩古气候恢复

地球化学元素除了在经历化学风化过程中,由于活动性差异而被用于分析化学风化程度外,部分元素由于自身的化学性质,不同气候环境的背景下会存在相应的富集。湖泊沉积岩中地球化学元素可以分为喜干元素与喜湿元素^[75],喜湿型元素为:Cr、Ni、Cu、Fe、Ba、Br、Co、Cs、Hf、Rb、Sc、Th;喜干型元素为:Sr、Pb、Au、As、Ca、Na、Ta、U、Zn、Mg、Mo、B。其中,Sr/Cu可以作为指示气候变化的一个指标^[75]。但对其划分湿润与干燥的界限在不同的学者间有不同的认识,部分学者认为以5作为干湿气候划分的界限^[76-77],但也有学者将界限定为10^[75,78],因此建议在选用该指数时仅讨论变化趋势。Mn在水体中以Mn²⁺的形式存在,在蒸发作用强的情况下,会沉淀析出。因此Mn含量与干旱气候相关^[79]。可以用富集系数来讨论沉积岩中Mn的富集情况:

$$EF_{Mn} = (Mn/Al)_{\text{样品}} / (Mn/Al)_{UCC} \quad (12)$$

式中:Mn和Al的单位为mol;UCC为大陆平均上地壳。当富集系数大于1时表示Mn富集,代表干热的气候^[80-81]。

湖泊沉积岩的氧同位素也可以用于研究古气候变化。湖泊沉积物氧同位素的变化与湖水氧同位素密切相关,能反映流域内的相对湿度、温度和蒸发量的综合变化^[82]。氧同位素的负偏可以指示全球气候的变暖。

最新的研究集中在对湖泊沉积岩反映的天文轨道周期控制的气候周期性变化和地球碳循环。用于反映该轨道循环的研究方法有磁化率(MS)^[83]、伽马射线(GR)测井曲线、深侧向电阻率(RD)、岩心高精度风化指数^[84]的变化以及有机物的相关参数。伽马射线主要与K、Th和U有关,而黏土矿物和有机质会吸附而富含这些元素。即伽马射线的高值对应富含黏土和有机质,这反映了温暖潮湿的气候条件^[85]。有机物的含量可以反映湖泊生产力与碳埋藏,如全岩有机碳含量(TOC)和有机碳同位素等^[86]。

4 深时古土壤古气候恢复

深时古土壤是指经过河流或风力搬运的碎屑物质在特定环境或气候变化下,碎屑物质暴露在空气中,随后经过长期降水淋滤(成土作用)后发育为土壤。土壤经过沉积埋藏、成岩,而在地层中保留为古土壤,其成土发育过程与降水等气候条件息息相关。深时古土壤是深时气候环境作用下的产物^[87],因此深时古土壤是良好的古气候分析材料。

根据降水淋滤的成土作用,土壤会发育土壤层(图3a):分别为淋溶层(A)、淀积层(B)、母质层(C)和母岩层(D)。目前对于深时古土壤的分类可以采用 Mack *et al.*^[89]提出的古土壤分类方法(图3b),其根据有机物的含量、土壤层的发育情况、土壤的氧化条件、原有沉矿物的风化、难溶性矿物/化合物的沉淀和可溶性矿物的富集,这六个条件将古土壤划分为九种类型:有机土(histosol)、弱发育土(protosol)、钙质土(calciisol)、灰土(spodosol)、氧化土(oxisol)、变性土(vertisol)、石膏土(gypsisol)、黏土(argillisol)和潜育土(gleysol)。不同的土壤类型所反映的气候特征有所差异,石膏土和钙质土反映的气候较为干旱,黏土和潜育土则是在相对湿润的环境下生成,而含有机质的有机土和灰土则可以表示更加湿润的气候。

4.1 黏土矿物及其同位素特征

古土壤中的黏土矿物包含从母岩风化区搬运而来的碎屑黏土矿物和成土过程中发育的自生黏土矿物。Myers *et al.*^[90]认为粒径小于2 μm的黏土矿物为自生黏土矿物。也有学者认为可以由衍射峰的面积

来对碎屑黏土矿物进行识别^[91]。古土壤黏土矿物组合所反映的气候信息及黏土矿物分析时的注意事项与沉积岩黏土矿物指示的信息一致。

古土壤中发育的黏土矿物在形成的过程中与土壤中水的同位素达到平衡,此时的温度与大气温度相平衡^[63,90]。根据 Clayton *et al.*^[92]和 Tabor *et al.*^[93]的研究,对黏土矿物的氧同位素值和氢同位素值($\delta^{18}\text{O}$ 、 δD)的分析可以估计古温度。Myers *et al.*^[90,94]根据 Delgado *et al.*^[95]提出的黏土矿物 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 同位素分馏公式进行演算与修改,提出根据古温度恢复的公式:

$$T_k = \sqrt{\frac{3.54 \times 10^6}{\delta^{18}\text{O} - 0.125\delta\text{D} + 8.95}} \quad (13)$$

式中: T_k 为古温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。Myers *et al.*^[94]将该公式用于计算葡萄牙上侏罗统古土壤反映的古气候信息,恢复的古温度为 $32^{\circ}\text{C} \sim 39^{\circ}\text{C}$ 。但该公式存在一定弊端,该式是基于黏土矿物与土壤中水达到同位素平衡的条件下建立的,因此如果地表水受到强烈蒸发作用的影响,估算的古温度值会偏低^[90,95]。

4.2 淀积层(B)深度及其地球化学特征

钙质土的淀积层是钙积层(B_k),钙积层发育的深度是指从土壤表层到土壤碳酸盐大量成层发育的土壤层深度,钙积层深度与年均降水量有密切的关系。Jenny *et al.*^[96]首次根据北美现代钙质土建立了年均降水与钙积层深度的相互关系公式,Sheldon *et al.*^[97]、Retallack^[98]对其研究结果进行补充,统计了全球大量土壤与年均降水(MAP)数据,拟合了这些数据的相关关系:

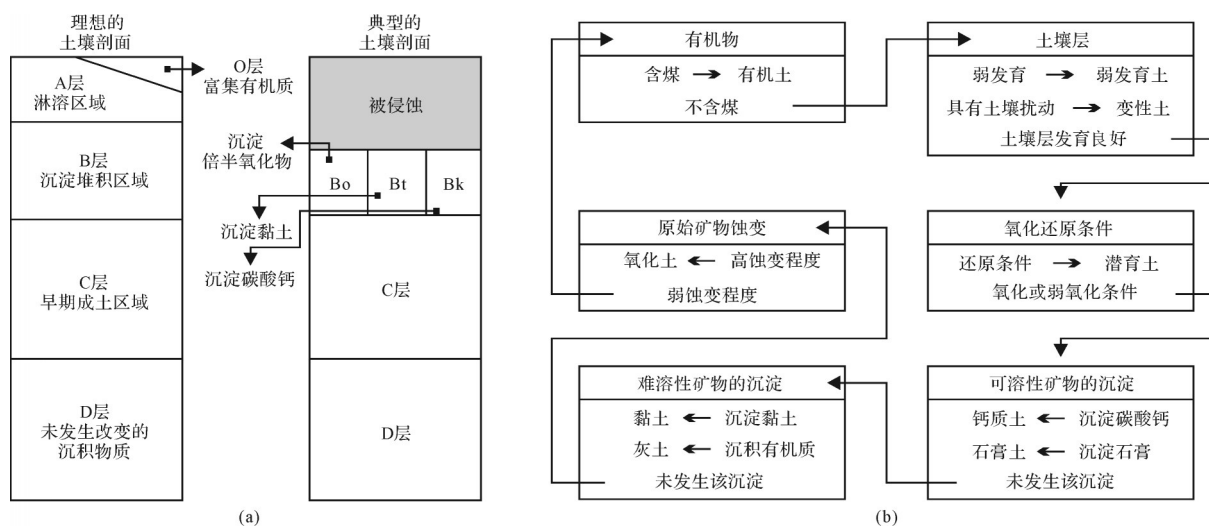


图3 (a)土壤剖面图(修改自Tabor *et al.*^[88]);(b)古土壤分类方法(修改自Mack *et al.*^[89])

Fig.3 (a) Paleosols profile (modified from Tabor *et al.*^[88]); (b) paleosols classification scheme (modified from Mack *et al.*^[89])

$$\text{MAP} = -0.013D^2 + 6.45D + 137.24 \quad (14)$$

式中:MAP为年均降水量,单位为mm/yr; D 为钙积层深度,单位为cm。李军等^[99]使用该公式计算了四川盆地中生代降水情况,结果显示年均降水量为145~1400 mm。即便目前该方法在古土壤研究中被广泛使用,但其存在一定弊端:该公式不适用于易受到侵蚀的山坡和陡峭地形形成的土壤^[97]。并且由于古土壤在埋藏前,土壤表层很可能被冲刷侵蚀,因而古土壤表层难以识别,导致识别出的土壤厚度存在误差^[90],因此该公式不具有普遍适用性。

古土壤淀积层(B)体现的是整个古土壤发育时期降水作用综合影响的结果,因此淀积层的地球化学分析可以恢复成土时期的风化信息。但只有发育较为成熟的土壤才适用于古气候分析,因此对于土壤成熟度的识别是将古土壤用于分析古气候的最初始工作。 $\Sigma \text{Base}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (其中, $\Sigma \text{Base}=\text{CaO}^*+\text{MgO}+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)可以表征土壤的风化程度和用于土壤分类。Sayyed *et al.*^[100]提出根据 $\Sigma \text{Base}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 小于0.5为受到强的淋滤作用。 Ba/Sr 也可以用来指示淋溶^[101], Sr 的溶解能力远高于Ba,因此 Ba/Sr 值越高指示淋溶程度越大^[63]。

古土壤学家提出了很多量化成土过程的计算公式(表2),Maher *et al.*^[102]根据磁化率会受到含铁矿物的数量、组成和粒度的控制,提出了土壤磁化率与年均降水量的关系(式15)。但磁化率也会受到土壤环境条件的影响,如温度、有机物含量等^[103],因此磁化率并不只是和降水量直接相关,不宜建立定量的研究指标。Sheldon *et al.*^[63]拟合了年均降水量与沉积层(B)CIA-K的关系函数(式16、17, $R^2=0.72$)。该式相关性较高,但只适用于年均降水在200~1600 mm范围内的古降水恢复,这是由于碱金属可能在成土过

程中流失殆尽^[97,104]。Sheldon *et al.*^[63]在更早还提出了其他的地球化学指标用来拟合古降水(式18, $R^2=0.66$;式19, $R^2=0.59$)。公式建立原理与用CIA-K恢复古降水的原理一致,但式(18)与式(19)更适用于拟合发育程度很高的古土壤,因此在恢复古降水时优先选用CIA-K来恢复古降水的变化^[63]。

Sheldon *et al.*^[97]对北美126个土壤数据拟合建立盐化指数(S,式21)与年均温度的相关关系函数(式20, $R^2=0.37$)。该公式的适用温度范围是2℃~20℃,在较高的温度下大部分的钾和钠被大量浸出,会使恢复的温度值偏低^[97]。

4.3 铁锰质结核铁含量特征

铁锰质结核通常发育在变性土中。由于变性土常含有蒙脱石而易于膨胀,因此通常不使用沉积层(B)厚度来恢复古降水信息,Stiles *et al.*^[105]将现代德克萨斯州土壤的铁锰质结核的铁含量与年均降水量拟合了一个关系式:

$$\text{MAP} = 654.4 + 31.5\text{Fe}_{\text{TOT}} \quad (22)$$

式中:MAP是年均降水量,单位为mm/yr; Fe_{TOT} 为总含铁量,单位为质量百分比; $R^2=0.92$ 。Stiles *et al.*^[105]将该公式用于古生代古土壤,其恢复的结果与野外特征相吻合。

4.4 成土方解石同位素特征

成土方解石的形成与土壤发育的环境有密切的关系,成土方解石同位素的测试可以使用定量指标来恢复高精度的古气候信息。成土方解石的发育环境如图4a所示,其同位素值反映了成土过程中碳酸盐离子与土壤中 CO_2 和土壤水达到同位素平衡条件下土壤环境的同位素组成^[106]。一般认为当土壤中孔隙溶液达到饱和状态后就会逐步发育为成土方解石(图4b)^[107-108]。在初期发育细丝或薄的碳酸盐包裹层

表2 淀积层(B)地球化学信息恢复古气候

Table 2 Paleoclimate analysis methods by the geochemical information of zone of accumulation (B horizon)

气候信息	计算公式
MAP	$\text{MAP} = 222 + 199 \log_{10} [(\chi_B - \chi_C) 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}]$ (15)
	$\text{MAP} = 221.1 e^{0.0197(\text{CIA} - \text{K})}$ (16)
	$\text{CIA} - \text{K} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}) \times 100(\%)$ (17)
	$\text{MAP} = -259.3 \ln \left[\frac{(\text{MgO} + \text{CaO}^* + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})}{\text{Al}_2\text{O}_3} \right] + 759$ (18)
	$\text{MAP} = -130.9 \ln (\text{CaO}^* / \text{Al}_2\text{O}_3) + 467$ (19)
MAT	$\text{MAT} = -18.56\text{S} + 17.298$ (20)
	$\text{S} = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3$ (21)

注:式(3), χ_B 为土壤磁化率, χ_C 为背景磁化率;式(5),(6),(7),(8)中用于计算的单位均为分子摩尔数;MAP为年均降水量,单位:mm/yr;MAT为年均温度,单位:℃。

(I 阶段), 随后发育成结核(II、III 阶段), 最终会在最上方形成封堵层(IV 阶段)。

成土方解石中碳同位素主要受到土壤中 CO_2 的同位素值控制, 而对于排水良好的古土壤来说, 土壤中 CO_2 的来源主要是土壤的呼吸作用和大气向土壤中扩散的 CO_2 ^[109]。但在一些碳酸盐基质的土壤中, 碳酸盐矿物溶解也会影响其碳同位素值^[110-111], 因此对含有碳酸盐岩的土壤, 不建议对其进行古气候重建。而在排水条件较差的环境中发育的古土壤^[63], 其碳同位素值只能反映有机物氧化的信息, 在这种条件下形成的成土方解石值较为负偏, 可以用来指示古植被信息, 但并不适合恢复古气候。对于排水良好的钙质土, 其成土方解石碳同位素值可以被用来恢复古大气 $p\text{CO}_2$ 水平。对于古土壤恢复古大气 $p\text{CO}_2$ 的计算是根据 Cerling^[112] 提出并由 Ekart *et al.*^[113] 重新公式化的计算方程:

$$C_A = S(z) \frac{\delta^{13}\text{C}_S - 1.0044\delta^{13}\text{C}_0 - 4.4}{\delta^{13}\text{C}_A - \delta^{13}\text{C}_S} \quad (23)$$

式中: $S(z)$ 指土壤在深度 z 处呼吸的 CO_2 的浓度, 单位为 mL/m^3 ; C_A 指大气 CO_2 的浓度, 单位为 mL/m^3 ; $\delta^{13}\text{C}_A$ 指大气中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值; $\delta^{13}\text{C}_S$ 指土壤中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值; $\delta^{13}\text{C}_0$ 指土壤呼吸产生的 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。用于古大气 $p\text{CO}_2$ 水平的成土方解石一般采集埋深大于 50 cm 的样品, 这样可以避免上部土壤中 CO_2 与大气 CO_2 未能达到平衡而引起预测误差^[95,113]。

$S(z)$ 的取值对恢复大气 $p\text{CO}_2$ 值有较大的影响, 普遍认为在土壤深度大于 50 cm 时 $S(z)$ 会保持恒

定^[113-114]。目前大多数论文计算取 $2\,500\text{ mL/m}^3$ 作为计算值, 但也有学者会根据土壤类型和降水等水文条件将 $S(z)$ 取为不同值^[115]。 $\delta^{13}\text{C}_A$ 值可以使用 Ekart *et al.*^[113] 提出的偏移量, 由同时期海洋沉积的碳酸盐碳同位素值计算得到; 除此以外, Arens *et al.*^[116] 提出可以通过用 C_3 植物的碳同位素值来估计。 $\delta^{13}\text{C}_S$ 值主要根据 Romanek *et al.*^[117] 提出的气相 CO_2 与碳酸盐之间分馏系数的计算方程, 由测定的成土方解石碳同位素值计算。 $\delta^{13}\text{C}_0$ 值, 一般取值于成土方解石结核中有机物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

Ekart *et al.*^[113] 最早使用该方法结合前人报道的古土壤中成土方解石的数据等大致推算了在不同地质历史时期的古大气 $p\text{CO}_2$ 水平。随后有大量学者使用该方法估计了各时期的大气 $p\text{CO}_2$ 水平。Nordt *et al.*^[118] 对美国达克萨斯州白垩纪古土壤恢复的大气 $p\text{CO}_2$ 水平, 与其他学者^[119] 对该时期不同地区古土壤恢复值和由植物叶片化石中气孔模拟的大气 $p\text{CO}_2$ 水平^[120], 反映的结果类似。

成土方解石氧同位素主要受到大气降水和温度的控制^[107,109], 但在近地面发生的蒸发作用会对其氧同位素值产生一定的干扰。大气降水与成土方解石间依赖温度控制的氧同位素分馏公式为^[121]:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW}) - \delta^{18}\text{O}_p(\text{SMOW}) = (2.78 \times 10^6 / T^2 - 2.89) \quad (24)$$

式中: $\delta^{18}\text{O}$ 为成土方解石氧同位素; $\delta^{18}\text{O}_p$ 为大气降水的氧同位素值; T 为绝对温度, 单位为 K。Dworkin *et al.*^[121] 最早根据氧同位素分馏公式和国际原子能机构

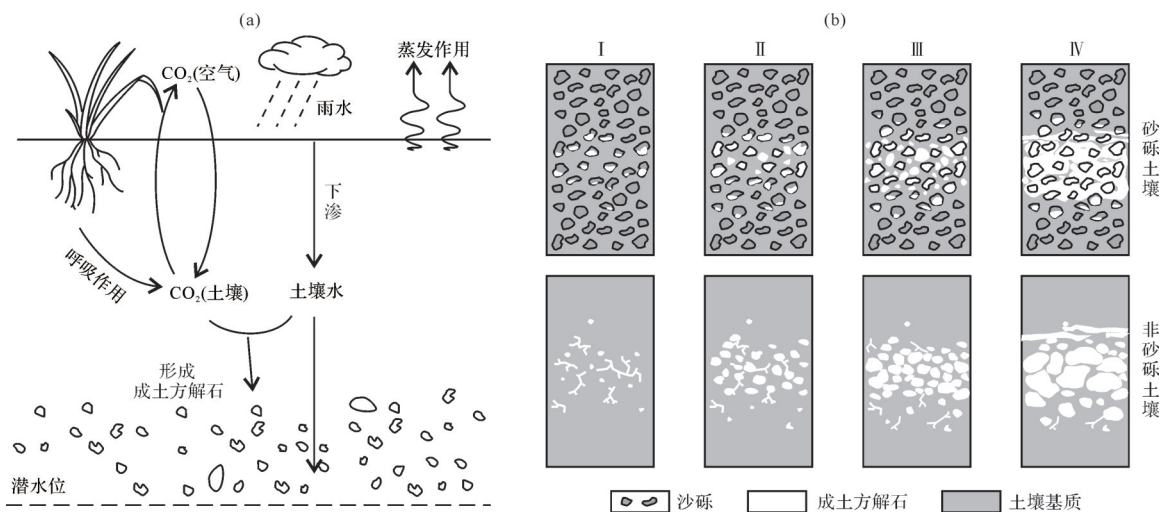


图4 (a) 钙质土成土作用过程示意图; (b) 成土方解石发育过程示意图(修改自 Gile *et al.*^[107])

Fig.4 (a) Schematic diagram of the pedogenic process of calcisol; (b) schematic diagram of the pedogenic calcite in different stage (modified from Gile *et al.*^[107])

(IAEA)在中纬度间大气降水和温度的相关关系式,提出利用成土方解石的 $\delta^{18}\text{O}$ 恢复古温度的计算公式:

$$0 = -0.50T^3 + (\delta^{18}\text{O} + 152.04)T^2 - 2.78 \times 10^6 \quad (25)$$

式中: $\delta^{18}\text{O}$ 是成土方解石的氧同位素值, T 为绝对温度,单位为K。该式建立的关键是在量化大气降水氧同位素与温度的相关关系后,带入分馏公式来建立成土方解石氧同位素与温度的相互关系。但大气降水的氧同位素值还受海拔高度^[122]和降水源区^[123]等的影响,并且在不同地质历史时期大气降水的同位素值对应温度的响应可能和现今不同,因此使用成土方解石氧同位素作为古温度计,可能并不适用于深时气候恢复。而成土方解石团簇同位素古温度计的应用可以很好地避免环境中水的同位素值对碳酸盐同位素的影响。

碳酸盐矿物中含有20种不同的碳酸盐离子同位素变体,每种离子同位素组都必须符合反应的平衡常数,而反应的平衡常数与温度有关^[124]。因此团簇同位素可以作为古温度计反应碳酸盐矿物形成时的温度。Ghosh *et al.*^[124]最早使用 Δ_{47} 来拟合温度函数,其对赤道珊瑚方解石样品的 Δ_{47} 和记录的温度数据拟合了一个关系式:

$$\Delta_{47} = 0.0592 \times 10^6 \times T^{-2} - 0.02 \quad (26)$$

式中: T 为温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。随后的研究者将该方法应用在不同研究材料中,逐步对该公式有进一步的修正^[125]。

该方法目前已经成功地应用于成土方解石^[126]。季顺川^[127]对天水盆地中晚中新世古土壤钙质结核测定的 Δ_{47} 重建的古土壤温度变化在 $13^{\circ}\text{C} \sim 22^{\circ}\text{C}$,测定结果与根据古降水氧同位素恢复的古温度测定的结果类似。Zhang *et al.*^[128]对松辽盆地晚白垩世发育的古土壤成土方解石 Δ_{47} 的研究显示当时夏季温度在 $15.2^{\circ}\text{C} \sim 42.1^{\circ}\text{C}$,与北美地区在该时期测定的结果一致。但由 Δ_{47} 恢复的古温度是碳酸盐生长的温度,这便要考虑两个问题。其一是要考虑土壤碳酸盐形成位置的温度和近地面空气温度的差异,其二是要考虑碳酸盐形成的季节,因为昼夜的温度变化或季节性温度变化可能超过研究时代的整体温度变化幅度^[107]。

根据目前研究结果,在土壤深度大于50 cm后,昼夜的温度波动可以忽略不计^[107],由于成土方解石发育的深度普遍在50 cm左右,因此不考虑由土壤深

度在不同样品间导致的分异。对于成土方解石季节性响应,Kelson *et al.*^[107]收集了大量全新世土壤方解石 Δ_{47} 和对应的温度,其研究显示,大多数由 Δ_{47} 恢复的温度高于年均温度,和年均温差在 $-4^{\circ}\text{C} \sim 24^{\circ}\text{C}$ 之间。目前普遍认为 Δ_{47} 恢复的温度为暖季平均温度,在利用 Δ_{47} 恢复古温度时,还要综合考虑土壤质地、季节性降水时间和植被覆盖情况。

4.5 成土菱铁矿同位素特征

成土菱铁矿(FeCO_3)主要发育在湿润的排水差、沼泽和缺氧的环境下。由于成土菱铁矿发育在还原环境中,所以成土菱铁矿的碳同位素能够反映产甲烷菌的甲烷生成过程,但无法被用来研究古气候信息^[63,129]。成土菱铁矿的氧同位素和温度,与淹没土壤的地下水中的氧同位素有关^[130],因此菱铁矿氧同位素有很大的古气候恢复潜力,但目前针对其开展的研究很少,值得进一步研究。

5 结论与建议

野外特征可以指示模糊的气候条件,如在某些特殊气候条件下会发育气候敏感性沉积物,可以指代对应的气候条件。泥岩地球化学特征与矿物学特征可以计算碎屑化学风化程度。湖泊沉积岩的元素比值、氧同位素可以研究古气候湿度与温度的相对变化,并且基于测井和高精度采样可以建立天文轨道周期性气候变化研究。但由于泥岩是碎屑物质经过搬运、沉积而形成的,因此其反映的气候信息只能是母岩区与整个沉积盆地大尺度范围内的综合气候变化信息。古土壤相比初次沉积的碎屑岩,其再次经历化学风化作用,因此碎屑岩与古土壤反映的化学风化信息存在差异。古土壤淀积层反映的是土壤形成区域更精确的风化信息,可以根据古土壤淀积层中黏土矿物、成土方解石和土壤基质的地球化学特征恢复古降水、古温度等定量的气候信息。

由于沉积特征指示的气候存在很多不确定性,因此野外沉积特征只能对古气候有一个简单的认识,如陆相红层和风成沉积等特征性沉积物都不能限定单一的气候特征。然而,即便沉积特征只能指示相对模糊的气候条件,但在古气候分析中沉积特征有着不可取代的地位。由沉积特征划定的气候条件是高精度气候分析的背景。通过沉积特征反映的气候变化情况与定量方程所拟合的气候信息相比,沉积特征反映的气候特征的可信度更高。

需要注意的是,古土壤在陆相地层中广泛存在。但古土壤相对于其碎屑母质来说,古土壤上部经历了降水淋滤等再次化学风化作用。在对陆相剖面各层泥岩的高精度分析时,如果没有识别和区分古土壤,采样时很可能将古土壤的淋滤层与母质层一同采样并分析。这会导致数据反映的古气候特征有较大误差。因此,建议对陆相沉积剖面进行采样分析时,首先要识别是否存在土壤特征而区分出相对成熟的古土壤。在对整个剖面采样时,要注意避免采集古土壤淀积层及上方经受成土作用的土壤层,但可以采集古土壤母岩层,将其地球化学信息和矿物学信息等参与到整个剖面化学风化作用趋势的讨论。

与较细粒沉积岩相比,古土壤能够反映气候信息的定性指标相对较多,但古土壤的发育受限于沉积环境,因而在地层中古土壤并不连续发育。并且相对于海相沉积,陆相沉积地层连续程度差并且常缺乏良好的定年数据,是陆相碎屑岩相对海相沉积岩固有的弊端。然而,陆相能够指示与气候相关更多的信息,如弥补海相地层氧同位素温度数据大多来自中低纬度地区的不足,由古风带恢复的古代季风变化,研究大陆内部的局部气候差异,海相气候与陆地气候的对比与变化机制的探索和陆相生物与气候的协同响应等。陆地是人类的主要生存环境,因此对陆相气候更加深入了解可以更好地预测未来气候变化对人类生存环境的影响,陆相古气候的恢复必不可少。此外随着“地时”(earth time)研究计划的不断开展,越来越多高精度的定年数据被发表,陆相古气候研究的可对比性不断加强,气候反映的时代也被进一步约束。但目前还需要对深时古气候建立更多分辨率更高更可靠的研究方法,并且各种数据之间的相互关系,如各时期生物、矿产等与气候变化的耦合关系也值得更深入的讨论和分析。

致谢 感谢审稿专家和编辑部老师提出的宝贵意见。

参考文献(References)

- [1] EM-DAT. EM-DAT Public [DB/OL]. <https://public.emdat.be/>, 2021-06-21.
- [2] Totman Parrish J, Soreghan G S. Sedimentary geology and the future of paleoclimate studies [J]. *The Sedimentary Record*, 2013, 11(2): 4-10.
- [3] 杨江海,颜佳新,黄燕. 从晚古生代冰室到早中生代温室的气候转变:兼论东特提斯低纬区的沉积记录与响应[J]. *沉积学报*, 2017, 35(5): 981-993. [Yang Jianghai, Yan Jiaxin, Huang Yan. The Earth's penultimate icehouse-to-greenhouse climate transition and related sedimentary records in low-latitude regions of eastern Tethys [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(5): 981-993.]
- [4] 孙枢,王成善. “深时”(Deep Time)研究与沉积学[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 792-810. [Sun Shu, Wang Chengshan. Deep time and sedimentology [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 792-810.]
- [5] Scotese C R, Song H J, Mills B J W, et al. Phanerozoic paleotemperatures: The earth's changing climate during the last 540 million years [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 215: 103503.
- [6] 王成善,胡修棉. 白垩纪世界与大洋红层[J]. *地学前缘*, 2005, 12(2): 11-21. [Wang Chengshan, Hu Xiumian. Cretaceous world and oceanic red beds [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(2): 11-21.]
- [7] 许艺炜,黄燕,胡修棉,等. 显生宙深时气候研究热点问题的文献计量分析[J]. *沉积学报*, 2017, 35(5): 994-1003. [Xu Yiwei, Huang Yan, Hu Xiumian, et al. Hot topics in Phanerozoic deep-time climate research: Based on bibliometric analysis [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(5): 994-1003.]
- [8] 王成善. 白垩纪地球表层系统重大地质事件与温室气候变化研究:从重大地质事件探寻地球表层系统耦合[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(8): 838-842. [Wang Chengshan. Coupling of the earth surface system: Inferring from the Cretaceous major geological events [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(8): 838-842.]
- [9] 高远,王成善,黄永建,等. 大陆科学钻探开展古气候研究进展[J]. *地学前缘*, 2017, 24(1): 229-241. [Gao Yuan, Wang Chengshan, Huang Yongjian, et al. Progress in the study of paleoclimate change in continental scientific drilling projects [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(1): 229-241.]
- [10] Tierney J E, Poulsen C J, Montañez I P, et al. Past climates inform our future [J]. *Science*, 2020, 370(6517): eaay3701.
- [11] Retallack G J. Multiple Permian-Triassic life crises on land and at sea [J]. *Global and Planetary Change*, 2021, 198: 103415.
- [12] 谭聪,于炳松,袁选俊,等. 鄂尔多斯盆地三叠统刘家沟组和尚沟组红层成色机制[J]. *现代地质*, 2020, 34(4): 769-783. [Tan Cong, Yu Bingsong, Yuan Xuanjun, et al. Color origin of the Lower Triassic Liujiagou and Heshanggou Formations red beds in the Ordos Basin [J]. *Geoscience*, 2020, 34(4): 769-783.]
- [13] Franke W, Paul J. Pelagic red beds in the Devonian of Germany-deposition and diagenesis [J]. *Sedimentary Geology*, 1980, 25(3): 231-256.
- [14] Ziegler A M, McKerrow W S. Silurian marine red beds [J]. *American Journal of Science*, 1975, 275(1): 31-56.
- [15] Sheldon N D. Do red beds indicate paleoclimatic conditions?: A Permian case study [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 228(3/4): 305-319.

- [16] Jiang Z X, Liu Q S, Dekkers M J, et al. Remagnetization mechanisms in Triassic red beds from South China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 479: 219-230.
- [17] 曹硕. 中国东部晚白垩世风成沉积: 盆山型沙漠体系[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020. [Cao Shuo. Late Cretaceous aeolian deposits in eastern China: The intermountain erg system [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.]
- [18] Zhu Z C, Kuang H W, Liu Y Q, et al. Intensifying Aeolian activity following the end-Permian mass extinction: Evidence from the Late Permian - Early Triassic terrestrial sedimentary record of the Ordos Basin, North China [J]. *Sedimentology*, 2020, 67(5): 2691-2720.
- [19] Mountney N P, Russell A J. Sedimentology of cold-climate aeolian sandsheet deposits in the Askja region of Northeast Iceland [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 166(3/4): 223-244.
- [20] 陈政宇, 柳永清, 江小均, 等. 柴达木旺尕秀煤矿东南晚侏罗世—早白垩世风成砂古风向及古地理意义[J]. *地学前缘*, 2020, 27(4): 82-97. [Chen Zhengyu, Liu Yongqing, Jiang Xiaojun, et al. Paleo-wind direction and paleogeographic significance of Late Jurassic to Early Cretaceous anemoarenite in the southeastern Wanggaxiu coal mine, Qaidam Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(4): 82-97.]
- [21] García Gil S. The sedimentological significance of a clastic wedge in the western basin margin of the Triassic Tethys (Iberian Range, Spain) [J]. *Cuadernos de geología ibérica*, 1991, (15): 209-239.
- [22] Boucot A J, 陈旭, Scotese C R, 等. 显生宙全球古气候重建[M]. 北京: 科学出版社, 2009. [Boucot A J, Chen Xu, Scotese C R, et al. Reconstruction of Phanerozoic global paleoclimate [M]. Beijing: Science Press, 2009.]
- [23] 周春光, 杨起, 潘治贵, 等. 从煤岩成分看延安期古气候变迁[J]. *中国煤田地质*, 1996, 8(4): 12-14, 19. [Zhou Chunguang, Yang Qi, Pan Zhigui, et al. Paleo-climate evolution of Yan'an stage inferred from petrographic composition of coal [J]. *Coal Geology of China*, 1996, 8(4): 12-14, 19.]
- [24] 邵龙义, 徐小涛, 王帅, 等. 中国含煤岩系古地理及古环境演化研究进展[J]. *古地理学报*, 2021, 23(1): 19-38. [Shao Longyi, Xu Xiaotao, Wang Shuai, et al. Research progress of palaeogeography and palaeoenvironmental evolution of coal-bearing series in China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2021, 23(1): 19-38.]
- [25] Nesbitt H W, Young G M. Formation and diagenesis of weathering profiles [J]. *The Journal of Geology*, 1989, 97(2): 129-147.
- [26] Reiche P. Graphic representation of chemical weathering [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1943, 13(2): 58-68.
- [27] Nesbitt H W, Young G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(7): 1523-1534.
- [28] Buggle B, Glaser B, Hambach U, et al. An evaluation of geochemical weathering indices in Loess-Paleosol studies [J]. *Quaternary International*, 2011, 240(1/2): 12-21.
- [29] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [30] McLennan S M. Weathering and global denudation [J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303.
- [31] 赵占仑, 温小浩, 汤连生, 等. 化学蚀变指数指示古气候变化的适用性探讨[J]. *沉积学报*, 2018, 36(2): 343-353. [Zhao Zhanlun, Wen Xiaohao, Tang Liansheng, et al. Applicability of chemical alteration index to indication of paleoclimate change by different sedimentary facies [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(2): 343-353.]
- [32] Wang P, Du Y S, Yu W C, et al. The chemical index of alteration (CIA) as a proxy for climate change during glacial-interglacial transitions in Earth history [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 201: 103032.
- [33] Li C, Yang S Y. Is chemical index of alteration (CIA) a reliable proxy for chemical weathering in global drainage basins? [J]. *American Journal of Science*, 2010, 310(2): 111-127.
- [34] Yang J H, Cawood P A, Du Y S, et al. Global continental weathering trends across the Early Permian glacial to postglacial transition: Correlating high- and low-paleolatitude sedimentary records [J]. *Geology*, 2014, 42(10): 835-838.
- [35] 曹莹. 化学风化指标对华北二叠纪—三叠纪陆地风化及气候变化的指示意义[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018. [Cao Ying. Permian-Triassic continental weathering and climates reconstructed in North China from chemical weathering indices [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.]
- [36] von Eynatten H, Tolosana-Delgado R, Karius V. Sediment generation in modern glacial settings: Grain-size and source-rock control on sediment composition [J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 280: 80-92.
- [37] Borges J B, Huh Y, Moon S, et al. Provenance and weathering control on river bed sediments of the eastern Tibetan Plateau and the Russian Far East [J]. *Chemical Geology*, 2008, 254(1/2): 52-72.
- [38] von Eynatten H, Barceló-Vidal C, Pawlowsky-Glahn V. Modeling compositional change: The example of chemical weathering of granitoid rocks [J]. *Mathematical Geology*, 2003, 35(3): 231-251.
- [39] Price J R, Velbel M A. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks [J]. *Chemical Geology*, 2003, 202(3/4): 397-416.
- [40] Parker A. An index of weathering for silicate rocks [J]. *Geological Magazine*, 1970, 107(6): 501-504.
- [41] Harnois L. The CIW index: A new chemical index of weather-

- ing[J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 55(3/4): 319-322.
- [42] Fedo C M, Wayne Nesbitt H, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 1995, 23(10): 921-924.
- [43] Panahi A, Young G M, Rainbird R H. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Québec, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(13): 2199-2220.
- [44] Rasmussen C, Brantley S, Richter D D, et al. Strong climate and tectonic control on plagioclase weathering in granitic terrain [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 301(3/4): 521-530.
- [45] 杨江海, 马严. 源—汇沉积过程的深时古气候意义[J]. *地球科学*, 2017, 42(11): 1910-1921. [Yang Jianghai, Ma Yan. Paleoclimate perspectives of source-to-sink sedimentary processes[J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1910-1921.]
- [46] Yang J H, Cawood P A, Du Y S, et al. Reconstructing Early Permian tropical climates from chemical weathering indices[J]. *GSA Bulletin*, 2016, 128(5/6): 739-751.
- [47] Qi L, Cawood P A, Yang J H, et al. Quantifying temperature variation between Neoproterozoic cryochron - nonglacial interlude, Nanhua Basin, South China[J]. *Precambrian Research*, 2020, 351: 105967.
- [48] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984. [Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, et al. *Geochemistry of element*[M]. Beijing: Science Press, 1984.]
- [49] 徐莉, 张成君, 贾松海, 等. 河南济源大峪槐圪塔岭二叠—三叠系元素地球化学特征及古环境[J]. *地质学报*, 2015, 89(1): 137-148. [Xu Li, Zhang Chengjun, Jia Songhai, et al. Element geochemistry and palaeoenvironment of Permian-Triassic stratum in the Huaigeda hill of Dayu town Jiyuan Basin, Henan province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(1): 137-148.]
- [50] 吴欣松, 郭娟娟, 黄永建, 等. 松辽盆地晚白垩世古气候变化的测井替代指标[J]. *古地理学报*, 2011, 13(1): 103-110. [Wu Xinsong, Guo Juanjuan, Huang Yongjian, et al. Well logging proxy of the Late Cretaceous palaeoclimate change in Songliao Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(1): 103-110.]
- [51] 贾建亮. 基于地球化学—地球物理的松辽盆地上白垩统油页岩识别与资源评价[D]. 长春: 吉林大学, 2012. [Jia Jianliang. Research on the recognition and resource evaluation of the Upper Cretaceous oil shale based on geochemistry-geophysics technique in the Songliao Basin (NE, China)[D]. Changchun: Jilin University, 2012.]
- [52] Ngueutchoua G, Ekoa Bessa A Z, Eyong J T, et al. Geochemistry of Cretaceous fine-grained siliciclastic rocks from upper Mundek and Logbadjeck Formations, Douala sub-basin, SW Cameroon: Implications for weathering intensity, provenance, paleoclimate, redox condition, and tectonic setting[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2019, 152: 215-236.
- [53] Li S L, Li W Q, Beard B L, et al. K isotopes as a tracer for continental weathering and geological K cycling [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(18): 8740-8745.
- [54] 王昆, 李伟强, 李石磊. 钾稳定同位素研究综述[J]. *地学前沿*, 2020, 27(3): 104-122. [Wang Kun, Li Weiqiang, Li Shilei. Stable potassium isotope geochemistry and cosmochemistry[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(3): 104-122.]
- [55] 苟龙飞, 金章东, 贺茂勇. 锂同位素示踪大陆风化: 进展与挑战[J]. *地球环境学报*, 2017, 8(2): 89-102. [Gou Longfei, Jin Zhangdong, He Maoyong. Using lithium isotopes traces continental weathering: Progresses and challenges [J]. *Journal of Earth Environment*, 2017, 8(2): 89-102.]
- [56] 柯珊, 刘盛遨, 李王晔, 等. 镁同位素地球化学研究新进展及其应用[J]. *岩石学报*, 2011, 27(2): 383-397. [Ke Shan, Liu Sheng'ao, Li Wangye, et al. Advances and application in magnesium isotope geochemistry [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(2): 383-397.]
- [57] 刘芮岑. 湖南茶陵盆地晚白垩世—古新世古气候分析[D]. 南京: 南京大学, 2018. [Liu Ruicen. Paleoclimate of the Late Cretaceous-Paleocene in the Chaling Basin, Hunan, South China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.]
- [58] 王尹, 李祥辉, 周勇, 等. 南雄盆地晚白垩世—古新世陆源沉积组份变化的古气候指示[J]. *沉积学报*, 2015, 33(1): 116-123. [Wang Yin, Li Xianghui, Zhou Yong, et al. Paleoclimate indication of terrigenous clastic rock's component during the Late Cretaceous-Early Paleocene in the Nanxiong Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(1): 116-123.]
- [59] 杨作升, 赵晓辉, 乔淑卿, 等. 长江和黄河入海沉积物不同粒级中长石/石英比值及化学风化程度评价[J]. *中国海洋大学学报*, 2008, 38(2): 244-250. [Yang Zuosheng, Zhao Xiaohui, Qiao Shuqing, et al. Feldspar/quartz (F/Q) ratios as a chemical weathering intensity indicator in different grain size-fractions of sediments from the Changjiang and Huanghe rivers to the seas [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2008, 38(2): 244-250.]
- [60] Kuhn G, Diekmann B. Late Quaternary variability of ocean circulation in the southeastern South Atlantic inferred from the terrigenous sediment record of a drift deposit in the southern Cape Basin (ODP Site 1089)[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 182(3/4): 287-303.
- [61] 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 黏土矿物的环境意义[J]. *地学前沿*, 2002, 9(2): 337-344. [Tang Yanjie, Jia Jianye, Xie Xiande. Environment significance of clay minerals [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 337-344.]
- [62] de Segonzac G D. The transformation of clay minerals during diagenesis and low grade metamorphism: A review [J]. *Sedimentology*, 1970, 15(3/4): 281-346.

- [63] Sheldon N D, Tabor N J. Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 95(1/2): 1-52.
- [64] Robert C. Late Quaternary variability of precipitation in southern California and climatic implications: Clay mineral evidence from the Santa Barbara Basin, ODP Site 893 [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(9/10): 1029-1040.
- [65] Jiménez-Espinosa R, Jiménez-Millán J. Calcrete development in mediterranean colluvial carbonate systems from SE Spain [J]. *Journal of Arid Environments*, 2003, 53(4): 479-489.
- [66] 陈涛,王欢,张祖青,等.黏土矿物对古气候指示作用浅析 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2003, 22(4): 416-420. [Chen Tao, Wang Huan, Zhang Zuqing, et al. Clay minerals as indicators of paleoclimate [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2003, 22(4): 416-420.]
- [67] 孙庆峰, Colin C, 陈发虎, 等. 气候环境变化研究中影响粘土矿物形成及其丰度因素的讨论 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(2): 291-300. [Sun Qingfeng, Colin C, Chen Fahu, et al. A discussion on the factors affecting formation and quantity of clay minerals in climatic and environmental researches [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2011, 30(2): 291-300.]
- [68] Bain D C. The weathering of chloritic minerals in some Scottish soils [J]. *European Journal of Soil Science*, 1977, 28(1): 144-164.
- [69] Gao Y, Gao Y F, Ibarra D E, et al. Clay mineralogical evidence for mid-latitude terrestrial climate change from the Latest Cretaceous through the earliest Paleogene in the Songliao Basin, NE China [J]. *Cretaceous Research*, 2021, 124: 104827.
- [70] Chamley H. *Clay sedimentology* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
- [71] Whitehouse U G, Jeffrey L M, Debbrecht J D. Differential settling tendencies of clay minerals in saline waters [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1958, 7(1): 1-79.
- [72] 吕斌,刘秀铭,郭晖,等.福建白垩系沙县组地层磁学特征及其环境意义 [J]. *沉积学报*, 2019, 37(3): 519-531. [Lü Bin, Liu Xiuming, Guo Hui, et al. Magnetic properties of the Cretaceous Shaxian Formation stratum in Fujian province and their environmental significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(3): 519-531.]
- [73] Jiang Z X, Liu Q S, Roberts A P, et al. A new model for transformation of ferrihydrite to hematite in soils and sediments [J]. *Geology*, 2018, 46(11): 987-990.
- [74] 章余银.太行山南部前寒武纪红层岩石磁学特征及其沉积环境初步探析 [D]. 福州:福建师范大学, 2017. [Zhang Yuyin. Magnetic characteristics of Precambrian red beds in Taihang mountains and its initial paleoenvironmental significance [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2017.]
- [75] 王峰,刘玄春,邓秀芹,等.鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义 [J]. *沉积学报*, 2017, 35(6): 1265-1273. [Wang Feng, Liu Xuanchun, Deng Xiuqin, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang Formation in Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(6): 1265-1273.]
- [76] 王随继,黄杏珍,妥进才,等.泌阳凹陷桃园组微量元素演化特征及其古气候意义 [J]. *沉积学报*, 1997, 15(1): 66-71. [Wang Suiji, Huang Xingzhen, Tuo Jincai, et al. Evolutional characteristics and their Paleoclimate significance of trace elements in the Hetaoyuan Formation, Biyang Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(1): 66-71.]
- [77] 尹锦涛,俞雨溪,姜呈馥,等.鄂尔多斯盆地张家滩页岩元素地球化学特征及与有机质富集的关系 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(6): 1544-1556. [Yin Jintao, Yu Yuxi, Jiang Chengfu, et al. Relationship between element geochemical characteristic and organic matter enrichment in Zhangjiantan shale of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(6): 1544-1556.]
- [78] 范萌萌,卜军,赵筱艳,等.鄂尔多斯盆地东南部延长组微量元素地球化学特征及环境指示意义 [J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(4): 633-642. [Fan Mengmeng, Bu Jun, Zhao Xiaoyan, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(4): 633-642.]
- [79] 徐立恒,陈践发,李玲,等.普光气藏长兴—飞仙关组碳酸盐岩C、O同位素、微量元素分析及古环境意义 [J]. *地球学报*, 2009, 30(1): 103-110. [Xu Liheng, Chen Jianfa, Li Ling, et al. Carbon, Oxygen isotope and trace element characteristics of carbonate rocks in Changxin-Feixianguan Formation of Puguang gas pool and its palaeoenvironment significance [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(1): 103-110.]
- [80] 朱丽霞,付修根,谭富文,等.羌塘盆地那底岗日地区上侏罗统一白垩统碳酸盐岩稀土元素地球化学与古气候 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2010, 30(4): 92-96. [Zhu Lixia, Fu Xiugen, Tan Fuwen, et al. REE geochemistry of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous carbonate rocks and palaeoclimates in the Nadigangri region, Qiangtang Basin [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2010, 30(4): 92-96.]
- [81] 沈立建,刘成林,王立成.云南兰坪盆地云龙组上段稀土、微量元素地球化学特征及其环境意义 [J]. *地质学报*, 2015, 89(11): 2036-2045. [Shen Lijian, Liu Chenglin, Wang Licheng. Geochemical characteristics of rare earths and trace elements, of the upper Yunlong Formation in Lanping Basin, Yunnan and its environments significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(11): 2036-2045.]
- [82] Wang C S, Scott R W, Wan X Q, et al. Late Cretaceous climate changes recorded in eastern Asian lacustrine deposits and North American Epiherc sea strata [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 126: 275-299.
- [83] Zhang Z H, Wang T T, Ramezani J, et al. Climate forcing of terrestrial carbon sink during the Middle Jurassic greenhouse cli-

- mate: Chronostratigraphic analysis of the Yan' an Formation, Ordos Basin, North China[J]. *GSA Bulletin*, 2021, 133(7/8): 1723-1733.
- [84] Yang H F, Huang Y J, Ma C, et al. Recognition of Milankovitch cycles in XRF core-scanning records of the Late Cretaceous Nenjiang Formation from the Songliao Basin (northeastern China) and their paleoclimate implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 194: 104183.
- [85] Peng C, Zou C C, Zhang S X, et al. Astronomically forced variations in multiresolution resistivity logs of lower Upper Cretaceous (Cenomanian-Coniacian) terrestrial formations from the Songliao Basin, northeastern China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 555: 109858.
- [86] Huang H, Gao Y, Ma C, et al. Organic carbon burial is paced by a ~173-ka obliquity cycle in the middle to high latitudes[J]. *Science Advances*, 2021, 7(28): eabf9489.
- [87] 李军,黄成敏,刘艳梅. 深时古土壤: 远古地球环境演变的“记录仪”[J]. *自然杂志*, 2021, 43(2): 141-148. [Li Jun, Huang Chengmin, Liu Yanmei. Deep-time paleosols: Recorders of the ancient Earth environmental evolution[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2021, 43(2): 141-148.]
- [88] Tabor N J, Myers T S. Paleosols as indicators of Paleoenvironment and paleoclimate[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43: 333-361.
- [89] Mack G H, James W C, Monger H C. Classification of paleosols[J]. *GSA Bulletin*, 1993, 105(2): 129-136.
- [90] Myers T S, Tabor N J, Jacobs L L, et al. Palaeoclimate of the Late Jurassic of Portugal: Comparison with the western United States[J]. *Sedimentology*, 2012, 59(6): 1695-1717.
- [91] 李双建,张然,王清晨. 沉积物颜色和粘土矿物对库车坳陷第三纪气候变化的指示[J]. *沉积学报*, 2006, 24(4): 521-530. [Li Shuangjian, Zhang Ran, Wang Qingchen. Implications of the color of sediments and clay minerals for Tertiary climatic changes of Kuqa Depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4): 521-530.]
- [92] Clayton R N, Mayeda T K. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1963, 27(1): 43-52.
- [93] Tabor N J, Montañez I P. Oxygen and hydrogen isotope compositions of Permian pedogenic phyllosilicates: Development of modern surface domain arrays and implications for paleotemperature reconstructions [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 223(1/2): 127-146.
- [94] Myers T S, Tabor N J, Jacobs L L. Late Jurassic paleoclimate of Central Africa[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 311(1/2): 111-125.
- [95] Delgado A, Reyes E. Oxygen and hydrogen isotope compositions in clay minerals: A potential single-mineral geothermometer [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(21): 4285-4289.
- [96] Jenny H, Leonard C D. Functional relationships between soil properties and rainfall [J]. *Soil Science*, 1934, 38(5): 363-382.
- [97] Sheldon N D, Retallack G J, Tanaka S. Geochemical climofunctions from North American soils and application to paleosols across the Eocene-Oligocene boundary in Oregon[J]. *The Journal of Geology*, 2002, 110(6): 687-696.
- [98] Retallack G J. Untangling the effects of burial alteration and ancient soil formation[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1991, 19: 183-206.
- [99] 李军,黄成敏,文星跃,等. 四川盆地中生代古气候变化: 来自深时古土壤证据[J]. *沉积学报*, 2021, 39(5): 1157-1170. [Li Jun, Huang Chengmin, Wen Xingyue, et al. Mesozoic paleoclimate reconstruction in Sichuan Basin, China: Evidence from deep-time paleosols[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(5): 1157-1170.]
- [100] Sayyed M R G, Hundekari S M. Preliminary comparison of ancient bole beds and modern soils developed upon the Deccan volcanic basalts around Pune (India): Potential for palaeoenvironmental reconstruction [J]. *Quaternary International*, 2006, 156-157: 189-199.
- [101] Sheldon N D. Abrupt chemical weathering increase across the Permian-Triassic boundary[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 231(3/4): 315-321.
- [102] Maher B A, Thompson R, Zhou L P. Spatial and temporal reconstructions of changes in the Asian palaeomonsoon: A new mineral magnetic approach [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 125(1/2/3/4): 461-471.
- [103] Buggle B, Hambach U, Glaser B, et al. Stratigraphy, and spatial and temporal paleoclimatic trends in southeastern/eastern European loess-paleosol sequences[J]. *Quaternary International*, 2009, 196(1/2): 86-106.
- [104] 王宇佳. 江西广丰晚白垩世周田组沉积特征与古气候分析[D]. 南昌: 东华理工大学, 2019. [Wang Yujia. Sedimentary characteristics and paleoclimate of the Zhoutian Formation in the Guangfeng Basin of Jiangxi province[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2019.]
- [105] Stiles C A, Mora C I, Driese S G. Pedogenic iron-manganese nodules in Vertisols: A new proxy for paleoprecipitation? [J]. *Geology*, 2001, 29(10): 943-946.
- [106] Gao Y, Ibarra D E, Caves Rugenstein J K, et al. Terrestrial climate in mid-latitude East Asia from the Latest Cretaceous to the earliest Paleogene: A multiproxy record from the Songliao Basin in northeastern China [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 216: 103572.
- [107] Gile L H, Peterson F F, Grossman R B. Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils [J]. *Soil Science*, 1966, 101(5): 347-360.
- [108] Kelson J R, Huntington K W, Breecker D O, et al. A proxy

- for all seasons? A synthesis of clumped isotope data from Holocene soil carbonates [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 234: 106259.
- [109] Fischer-Femal B J, Bowen G J. Coupled carbon and oxygen isotope model for pedogenic carbonates [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, 294: 126-144.
- [110] Yapp C J. Rusty relics of earth history: Iron (III) oxides, isotopes, and surficial environments [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2001, 29: 165-199.
- [111] Yapp C J. Mixing of CO₂ in surficial environments as recorded by the concentration and δ¹³C values of the Fe(CO₃)OH component in goethite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(22): 4115-4130.
- [112] Cerling T E. Carbon dioxide in the atmosphere: Evidence from Cenozoic and Mesozoic paleosols [J]. *American Journal of Science*, 1991, 291(4): 377-400.
- [113] Ekart D D, Cerling T E, Montanez I P, et al. A 400 million year carbon isotope record of pedogenic carbonate: Implications for paleoatmospheric carbon dioxide [J]. *American Journal of Science*, 1999, 299(10): 805-827.
- [114] Cerling T E. The stable isotopic composition of modern soil carbonate and its relationship to climate [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 71(2): 229-240.
- [115] Pavlov A A, Mills M J, Toon O B. Mystery of the volcanic mass-independent sulfur isotope fractionation signature in the Antarctic ice core [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(12): L12816.
- [116] Arens N C, Jahren A H, Amundson R. Can C₃ plants faithfully record the carbon isotopic composition of atmospheric carbon dioxide? [J]. *Paleobiology*, 2000, 26(1): 137-164.
- [117] Romanek C S, Grossman E L, Morse J W. Carbon isotopic fractionation in synthetic aragonite and calcite: Effects of temperature and precipitation rate [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(1): 419-430.
- [118] Nordt L, Atchley S, Dworkin S. Terrestrial evidence for two greenhouse events in the Latest Cretaceous [J]. *GSA Today*, 2003, 13(12): 4-9.
- [119] Cojan L, Moreau M G, Stott L E. Stable carbon isotope stratigraphy of the Paleogene pedogenic series of southern France as a basis for continental-marine correlation [J]. *Geology*, 2000, 28(3): 259-262.
- [120] Beerling D J, Lomax B H, Royer D L, et al. An atmospheric pCO₂ reconstruction across the Cretaceous-Tertiary boundary from leaf megafossils [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002, 99(12): 7836-7840.
- [121] Dworkin S I, Nordt L, Atchley S. Determining terrestrial paleotemperatures using the oxygen isotopic composition of pedogenic carbonate [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237(1/2): 56-68.
- [122] Chamberlain C P, Mix H T, Mulch A, et al. The Cenozoic climatic and topographic evolution of the western North American Cordillera [J]. *American Journal of Science*, 2012, 312(2): 213-262.
- [123] Gao Y, Ibarra D E, Wang C S, et al. Mid-latitude terrestrial climate of East Asia linked to global climate in the Late Cretaceous [J]. *Geology*, 2015, 43(4): 287-290.
- [124] Ghosh P, Adkins J, Affek H, et al. ¹³C-¹⁸O bonds in carbonate minerals: A new kind of paleothermometer [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(6): 1439-1456.
- [125] 李平平, 马倩倩, 邹华耀, 等. 团簇同位素的基本原理与地质应用 [J]. *古地学报*, 2017, 19(4): 713-728. [Li Pingping, Ma Qianqian, Zou Huayao, et al. Basic principle of clumped isotopes and geological applications [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(4): 713-728.]
- [126] Ghosh P, Garzione C N, Eiler J M. Rapid uplift of the Altiplano revealed through ¹³C-¹⁸O bonds in paleosol carbonates [J]. *Science*, 2006, 311(27): 511-515.
- [127] 季顺川. 利用天水盆地碳酸钙同位素重建中新世中晚期大气CO₂浓度变化 [D]. 兰州: 兰州大学, 2017. [Ji Shunchuan. Reconstructing Mid-Late Miocene atmospheric CO₂ concentration using carbonate isotopes from the Tianshui Basin, northern China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.]
- [128] Zhang L M, Wang C S, Wignall P B, et al. Deccan volcanism caused coupled pCO₂ and terrestrial temperature rises, and pre-impact extinctions in northern China [J]. *Geology*, 2018, 46(3): 271-274.
- [129] Bojanowski M J, Goryl M, Kremer B, et al. Pedogenic siderites fossilizing Ediacaran soil microorganisms on the Baltica paleocontinent [J]. *Geology*, 2020, 48(1): 62-66.
- [130] Ufnar D F, Ludvigson G A, González L A, et al. High latitude meteoric δ¹⁸O compositions: Paleosol siderite in the Middle Cretaceous Nanushuk Formation, North Slope, Alaska [J]. *GSA Bulletin*, 2004, 116(3/4): 463-473.

Research Status of Deep-time Paleoclimate Analysis Methods for Terrestrial Pulveryte and Paleosols

ZHANG HongYu¹, YANG WenTao^{1,2}

1. School of Resource and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China

2. Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region, Henan Province, Jiaozuo, Henan 454003, China

Abstract: Paleoclimate reconstruction is important for predicting future climate change. The continental paleoclimate plays an important role in dividing global paleoclimate zones, contrasting marine paleoclimate differences and establishing climate models. Climatologically sensitive deposits contain the records of paleoclimate information. Stronger chemical weathering indicates a warmer and more humid paleoclimate. Chemical weathering indices (e.g., CIA, WIP, CIW, PIA, τ_{Na} and non-traditional isotope) have been established by geochemical data derived from mudstone. Mineralogical characteristics of clastic rocks (e.g., mineral maturity, different combinations of clay minerals and magnetic mineral) indicate different paleoclimates. The paleoclimatic analysis of lacustrine sediments includes the element ratio and the study of astronomically forced paleoclimate changes based on high-precision analysis. Paleosols indicate paleoclimate: paleoprecipitation can be calculated from the depth to the pedogenic carbonate (B_k) horizon in paleosols. Paleotemperature, paleoprecipitation and paleoatmospheric carbon dioxide concentration (pCO_2) can be calculated using the geochemical characteristics of clay minerals, pedogenic calcite, Fe-Mn nodules and the paleosol matrix. In the future, more and higher-resolution continental paleoclimate analysis methods need to be established and improved.

Key words: deep time paleoclimate; pulveryte; chemical weathering; paleosols