



## 异整合面——古环境剧变的地层记录

高远, Alan R. Carroll, 王成善

### 引用本文:

高远, Alan R. Carroll, 王成善. 异整合面——古环境剧变的地层记录[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 46–57.

GAO Yuan, CARROLL Alan R., WANG ChengShan. Xenocomformity: A stratigraphic surface representing fundamental and abrupt paleoenvironmental change[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 46–57.

### 相似文章推荐 (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)

#### 峡东地区震旦纪最早期风暴沉积记录及其地质意义

Early Sinian Storm Deposits in the Eastern Yangtze Gorges Area and their Geological Significance

沉积学报. 2020, 38(1): 182–195 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.003>

#### 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 Paleocli-mate

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

#### 再论中国含煤岩系沉积学研究进展及发展趋势

A Reappraisal on Development and Prospect of Coal Sedimentology in Chi-na

沉积学报. 2017, 35(5): 1016–1031 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2017.05.013>

#### 冲积扇沉积向滨岸沉积的转变——以华北克拉通南缘中元古界兵马沟组为例

An Alluvial Fan to Coastal Transition: A case study of Mesoproterozoic Bingmagou Formation, southern margin of the North China Craton

沉积学报. 2017, 35(4): 752–762 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2017.04.009>

#### 江苏南通地区晚第四纪下切河谷沉积与环境演变

Sedimentary Characteristics and Environmental Evolution of the Late Quaternary Incised-Valley Fills in the Nantong Area of Jiangsu Province, China

沉积学报. 2016, 34(2): 268–280 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.02.006>

# 异整合面——古环境剧变的地层记录

高远<sup>1</sup>, Alan R. Carroll<sup>2</sup>, 王成善<sup>1</sup>

1. 生物地质与环境地质国家重点实验室, 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083  
2. 威斯康星大学麦迪逊分校地球科学系, 麦迪逊, 威斯康星州 53706, 美国

**摘要** 异整合面是在区域(盆地尺度)或全球范围内发生根本性的、突然的、持续性的沉积相变而形成的地层界面。有别于传统的沉积学和地层学概念以沉积环境保持稳定或者缓慢连续变化为前提, 异整合面强调古环境剧变事件在地层中的记录, 它是不遵循瓦尔特相律的地层界面。陆相环境波动频繁、变化剧烈, 容易发育异整合面, 例如北美古近系绿河组、松辽盆地白垩系、准噶尔盆地二叠系中的异整合面。海相地层异整合面的成因是全球性的气候剧变事件, 例如古新世—始新世界线、白垩纪—古近纪界线、奥陶纪—志留纪界线、成冰纪—埃迪卡拉纪界线发育的异整合面。异整合面的识别和研究有助于深入理解地质历史中气候环境变化的临界点和转折期及其在沉积体系中的响应。古环境剧变往往直接影响有机质的埋藏和富集, 是非常规油气沉积学研究的重要内容之一, 因此异整合面的识别和研究对于全球油气资源勘探也具有重要指导意义。

**关键词** 异整合面; 古环境; 古气候; 沉积学; 地层学

**第一作者简介** 高远, 男, 1987年出生, 副教授, 沉积学与古环境, E-mail: yuangao@cugb.edu.cn

**通信作者** 王成善, 男, 院士, E-mail: chshwang@cugb.edu.cn

**中图分类号** P539.6 **文献标志码** A

## 0 引言

沉积学与地层学的经典理论往往要求古环境保持稳定或者缓慢而连续的变化。百年前提出的“瓦尔特相律”为分析沉积相和沉积环境、探讨地层时空关系奠定了理论基础<sup>[1-4]</sup>。瓦尔特相律的涵义是“只有横向上相互毗邻的相和相区, 才能在纵向上原生叠覆在一起”, “相”具有沉积环境和沉积物双重意义, 相律应用的前提是沉积环境缓慢连续变化。瓦尔特相律的拓展和延伸构成了层序地层学的理论基础, 并在油气地质学和诸多沉积岩相关研究领域取得了广泛应用<sup>[5-6]</sup>。

然而在沉积学和地层学研究中, 越来越多的发现一些不遵循瓦尔特相律的地质现象, 例如在整合的地层中出现突然的、不连续的相变, 导致这些“非瓦尔特相律”相变的重要原因是古环境快速的、显著的变化。这些相变界面往往也是岩石地层学、年代地层学、层序地层学、地震地层学中明显的地质界

面, 代表了古环境剧变事件, 但是在经典的沉积学和地层学理论中缺少一个合适的术语描述此类界面。为此, 美国威斯康星大学麦迪逊分校沉积学家 Alan R. Carroll 教授于 2017 年提出了“异整合面(xenoconformity)”的概念, 来描述古环境剧变事件导致沉积体系发生根本性变化而产生的相变界面<sup>[7]</sup>。值得关注的是, 近两年来我国学者提出全球非常规油气资源沉积富集与重大地质环境突变密切相关<sup>[8-9]</sup>, 与异整合面相关的古环境剧变事件往往直接影响有机质的埋藏和富集, 是非常规油气沉积学研究的重要内容之一, 对寻找非常规油气资源具有重要指导意义。因此, 在之前研究的基础上, 本文对异整合面的定义和基本原理做进一步讨论, 举例说明不同沉积环境下典型的异整合面, 尤其重点阐述异整合面在含油气盆地中的特征和意义, 希望能为解决沉积学、地层学和油气地质学研究中的某些问题有所帮助。因笔者学识所限, 文章疏漏之处尚望同行专家斧正。

收稿日期: 2020-07-06; 收修改稿日期: 2020-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972096); 教育部基本科研业务费项目(2652018119); “111计划”项目(B20011)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41972096; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2652018119; The “111” Project, No. B20011]

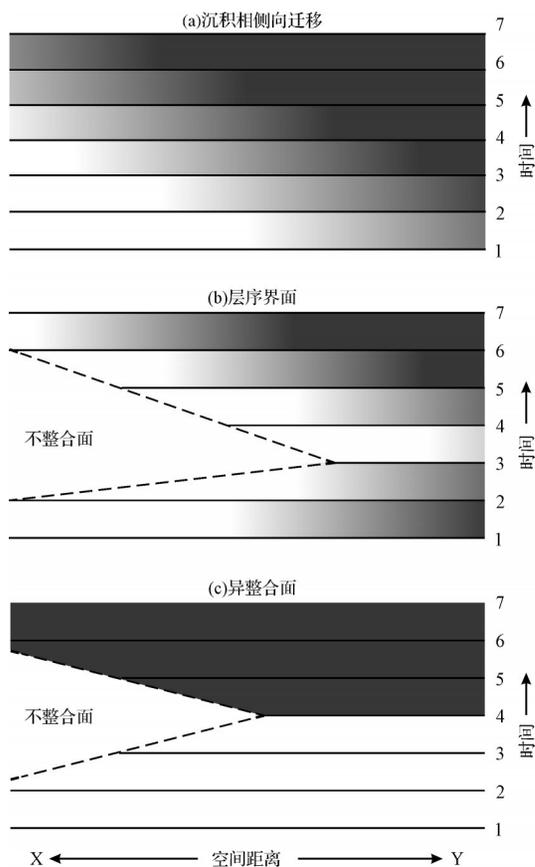


图1 异整合面的概念模型及与其他地质界面的关系  
图中横轴X-Y代表空间距离,纵轴数字1-7代表时代由老到新,灰度变化代表沉积相迁移。对瓦尔特相律、层序界面、整合面、不整合面、异整合面的讨论参见正文。修改自文献[7]

Fig.1 Schematic models for xenoconformity and other related stratigraphic surfaces

## 1 异整合面的涵义

异整合面是盆地尺度到全球尺度根本性的、突然的、持续性的沉积相变产生的地层界面<sup>[7]</sup>(图1c)。“根本性(fundamental)”指异整合面上下沉积体系发生彻底改变;“突然(abrupt)”指相变发生迅速,表现在地层记录上是一个界面或者很薄的一层;“持续性(persistent)”指相变突然发生后在较长时间内环境保持稳定,而不是沉积相周期性变化。在地层记录中,异整合面具有岩性突变、沉积相或相组合突变、生物灭绝、地球物理界面(如地震反射界面)、地球化学信号突变(如稳定同位素偏移)等不同特征<sup>[7]</sup>。快速的、显著的古环境剧变事件是导致异整合面发育的根本原因,这决定了此类界面的发育不遵循瓦尔特相律,而是记录了沉积体系的突然转变<sup>[7]</sup>。

异整合面与整合面(conformity)、不整合面(unconformity)涵义不同却有关联。整合面是连续沉

积、没有明显沉积间断的地层界面,通常是在稳定的或者缓慢连续变化的沉积环境下形成的<sup>[10]</sup>(图1a)。然而,快速的、显著的沉积环境变化可能导致连续沉积的地层中出现明显相变,这一类具记录明显相变的整合面即是异整合面(图1c)。不整合面是具有显著沉积间断的地层界面,常被认为不遵循瓦尔特相律<sup>[10]</sup>(图1b,c)。但是,导致不整合面发育的因素包括构造运动(如地壳抬升和地表风化剥蚀)、气候环境变化(如冰川作用导致海平面下降、干旱气候导致湖平面下降)等多种。如果沉积间断仅仅由构造剥蚀导致、间断期间环境缓慢变化,理论上并不违背瓦尔特相律,就连瓦尔特本人也认为地层剥蚀(erosion)仅仅是另一种表现形式的相<sup>[2,11]</sup>(图1b)。本文认为,由于地质学家往往对沉积盆地中不整合面的特征和成因有较好的认识,识别和研究整合地层中的异整合面、分析其形成的古环境背景在未来沉积学和地层学研究中可能具有更重要的意义。

层序地层学中的“层序界面”是与异整合面涵义较接近的地层学术语。层序地层学的理论基础是地层层序叠加样式受控于沉积物供给和可容纳空间变化,本质上依附于瓦尔特相律<sup>[5-6]</sup>。层序界面是划分层序的不整合面及其相关的整合面,通常是一些海(湖)泛面或者暴露侵蚀面<sup>[5-6]</sup>(图1b)。异整合面与层序界面的概念相对比,一方面两者有不同之处,前者可以完全是一个整合面,只要沉积相突变是由快速的、显著的古环境剧变所导致,后者通常至少含有部分不整合面,而且可以由缓慢的沉积相变所形成的;另一方面,由古环境剧变导致的、不遵循瓦尔特相律的层序界面即是异整合面,这时两个概念的涵义又是一致的<sup>[7]</sup>(图1c)。

另一个与异整合面涵义相关的概念是“事件沉积”或“事件地层”。事件沉积是罕见的地质事件保留下来的沉积记录<sup>[12]</sup>。事件地层是利用等时的、空间分布广的、可在地层中留下记录的地质事件来划分对比地层的方法<sup>[13]</sup>。事件沉积、事件地层和异整合面的相似之处是它们都关注古环境剧变这类地质事件的沉积记录,但是前两者还关注火山爆发、地震等地质事件的直接记录(如火山灰),即使事件没有产生明显的环境效应。此外,有些地质事件可以造成古环境短暂变化,但是不会根本性改变沉积体系,例如浊流事件、风暴事件等,由此而产生的地层界面也不属于异整合面。

## 2 陆相地层中的异整合面

陆地环境具有类型多样、变化频繁、波动显著等特点,因此理论上陆相地层中容易发育异整合面。湖泊沉积对环境变化的响应非常敏感,而且时间上相对连续、空间分布较为局限,因此异整合面更可能在湖泊盆地中保存下来<sup>[7]</sup>。本节以北美古近系绿河组、松辽盆地白垩系和准噶尔盆地二叠系中的异整合面为例,探讨古环境剧变在陆相湖泊盆地中的记录及其与油气资源分布的潜在联系。

### 2.1 北美古近系绿河组异整合面

北美科迪勒拉造山带东侧的褶皱逆冲带中分布着一系列小型陆相湖泊盆地,这些盆地在白垩纪晚期到古近纪早期接受沉积<sup>[14-15]</sup>。其中绿河组(Green River Formation)是一套始新世早中期的湖泊沉积,主要分布在美国怀俄明州、科罗拉多州、犹他州等地,沉积厚度可达两千米<sup>[15-16]</sup>。绿河组保存了完整的地质历史时期湖泊体系演化信息,记录了古近纪早期陆地极热气候,同时蕴藏了丰富的油页岩、煤、盐类沉积等资源,因此长期以来是陆相沉积学和地层学研究的热点<sup>[7,15-17]</sup>。

根据岩性、地层叠加样式、沉积构造、古生物类群和有机质含量等资料,绿河组的沉积特征可以归纳为三种沉积相组合(facies associations):河流湖泊相组合(fluvial-lacustrine)主要特征是含有淡水生物化石和煤层的进积层序,波动深湖相组合(fluctuating-profunda)主要特征是进积和加积层序、耐高盐度的生物化石和富含I型有机质的暗色泥岩,蒸发相组合(evaporative)主要特征是加积层序、含有蒸发盐矿物、泥岩有机质类型多样<sup>[16-18]</sup>。不同沉积相组合之间通常以明显的层面或者几厘米到几十厘米的过渡层相分隔,并且这些层面或薄过渡层在盆地内是稳定连续的<sup>[19-21]</sup>。绿河组 Wilkins Peak 段(WPM)和上覆 Laney 段 LaCledde 层(LLB)之间的界面就是一个典型代表(图2)。WPM 沉积特征为蒸发相的富钠碳酸盐层,缺少湖相生物化石,有机质富集程度低,基于费舍尔含油率分析(Fischer assay)每吨岩石产油率峰值在1~2加仑<sup>[21-22]</sup>(图2)。反之,上覆LLB不含蒸发盐矿物,却含有大量的鱼和水生节肢动物化石,其空间分布范围比WPM更广,有机质富集程度高,费舍尔分析显示每吨岩石产油率峰值达到8~9加仑<sup>[21-22]</sup>(图2)。

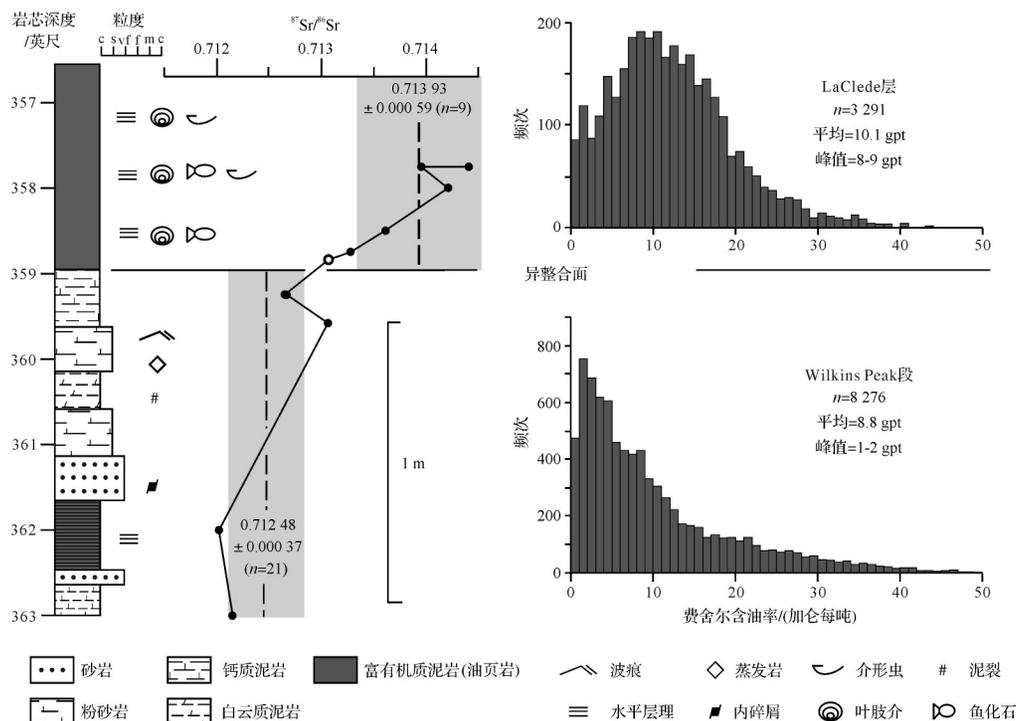


图2 北美古近系绿河组 WPM-LLB 异整合面

图中岩性地层据绿河组 WM-1 岩芯; 总同位素数据中, 竖虚线代表 WPM 顶部 10 米和 LLB 底部 10 米的平均值, 灰色框代表  $\pm 1$  标准偏差; 费舍尔含油率分析柱状图不包括小于 0.5 加仑/吨的数据; 粒度代号 c-黏土, s-粉砂, vf-极细砂, f-细砂, m-中砂, c-粗砂。修改自文献<sup>[7]</sup>。

Fig.2 Xenconformity at WPM-LLB boundary in the Paleogene Greenriver Formation

绿河组 WPM-LLB 界面是一个沉积相突变面,也是一个整合面,年代学证据支持界面上下没有显著的沉积间断<sup>[15,23]</sup>。这个界面在多个钻井和露头剖面均可追索,与几层火山灰大致平行,显示其在盆地范围内连续稳定分布<sup>[23]</sup>。同时,跨过界面发生了显著的锶同位素偏移,<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 平均值从 WPM 顶部的 0.712 48 变为 LLB 底部的 0.713 93,如此大的变化几乎等于整个显生宙海水锶同位素的变化量,但是在绿河组却出现在小于 50 cm 的薄层中(图 2)。

绿河组 WPM-LLB 界面是一个典型的异整合面。异整合面上下地层连续发育却指示了截然不同的沉积环境,这无法用瓦尔特相律解释。异整合面之下 WPM 富含蒸发岩、不含鱼化石说明湖泊处于超咸化环境,有机质含量低是因为湖平面低且波动频繁导致生产力和保存条件较差。相反,异整合面之上 LLB 突然出现湖相生物化石、湖泊面积突然增大表明湖平面升高、湖水盐度降低<sup>[21]</sup>。绿河组 WPM-LLB 异整合面产生的原因是盆地东部的一条河流改道并注入湖泊带来大量淡水,同时气候变湿润降雨量增加,从而改变了湖盆流域的水文平衡,最终导致沉积环境剧变<sup>[7,20]</sup>。盆地东部前寒武纪岩石的风化带来大量高放射性锶的沉积物引起锶同位素快速升高,而湖泊沉积环境剧变决定了有机质富集程度由低变高<sup>[20-21]</sup>。

### 2.2 松辽盆地白垩系异整合面

松辽盆地是位于我国东北地区的大型陆相含油气盆地,其主要沉积时期是白垩纪,保存了厚度可达万米的陆相地层<sup>[24-25]</sup>。近年来开展的“松辽盆地国际

大陆科学钻探工程”将在全球首次获取整个白垩系连续完整的岩芯记录<sup>[24-27]</sup>。开展松辽盆地白垩系的沉积学、地层学和古环境研究具有重要意义,一是探索白垩纪温室气候时期陆地气候环境变化的规律及其对生物演化的影响,为人类社会应对全球变暖提供科学借鉴;二是探讨陆相盆地大规模有机碳埋藏的过程和规律,为支撑大庆油田未来发展提供科学依据<sup>[26]</sup>。

松辽盆地上白垩统发育两套湖相暗色泥岩——青山口组和嫩江组一二段,也是盆地最重要的两套烃源岩<sup>[24]</sup>。这两套暗色泥岩上下是河流相或三角洲相沉积,可见截然的相变界面。以松科 1 井南孔岩芯为例,姚家组主要发育灰棕色、灰绿色粉砂岩、泥质粉砂岩和泥岩,为滨浅湖和三角洲相沉积,典型的古土壤结构构造表明沉积物常处于暴露环境<sup>[28]</sup>(图 3)。姚家组顶部岩性快速过渡到嫩江组一段底部的深灰色、灰黑色泥岩和油页岩,后者指示半深湖—深湖的沉积环境<sup>[29]</sup>。伴随着沉积相变,古生物和地球化学记录还捕捉到介形类丰度的增加、TOC 增加、碳同位素负偏和锶同位素正偏等信号<sup>[30-32]</sup>(图 3)。

姚家组和嫩江组一段的界面是一个异整合面。基于全盆地的沉积相研究表明,嫩江组一段开始湖泊面积快速扩张至 20×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,湖水几乎覆盖了整个盆地,这与姚家组大型三角洲发育的环境截然不同<sup>[24-25]</sup>。快速湖侵可能是气候环境事件与构造沉降共同作用的结果,松科 1 井的孢粉指标证明跨过姚家组—嫩江组一段异整合面气候快速变湿变冷<sup>[33]</sup>。锶

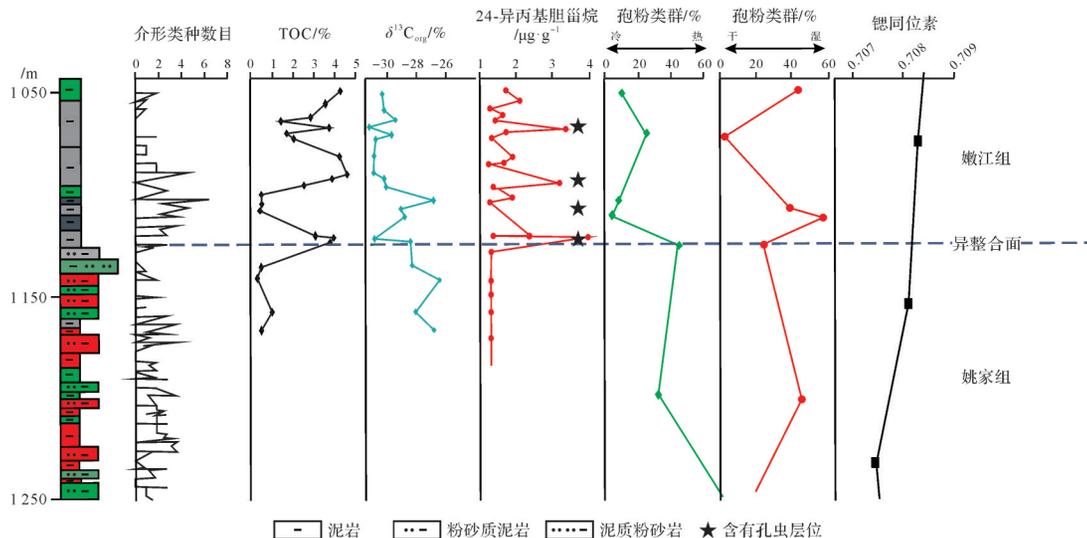


图 3 松辽盆地上白垩统姚家组—嫩江组界面异整合面(据文献[31-34]修改)

Fig.3 Xenoconformity at the boundary of Yaojia Formation and Nenjiang Formation in the Cretaceous Songliao Basin (modified from references [31-34])

同位素的正偏指示了物源自西向东的转变,有孔虫化石和海相生物标志物指示了嫩江组一段的快速海水入侵事件,河流注入和海水入侵可能进一步加剧了湖泊扩张<sup>[30-31,34]</sup>(图3)。沉积体系的突然转变促进了生物群的繁盛和生产力的提高,湖泊分层导致了湖底高盐度缺氧环境,最终导致大量有机质的保存<sup>[32]</sup>。

### 2.3 准噶尔盆地二叠系异整合面

准噶尔盆地是位于我国西北地区的大型多期含油气叠合盆地,沉积了古生代至新生代的地层<sup>[35-36]</sup>。二叠纪是盆地演化的一个重要阶段,期间盆地经历了构造体系转变、沉积环境由海向陆转变、古气候显著波动和大规模有机碳埋藏等一系列地质过程<sup>[37-38]</sup>。同时,二叠系也发育了准噶尔盆地最重要的烃源岩,有代表性的烃源岩层位包括下二叠统风城组和中二叠统芦苇沟组等<sup>[38-39]</sup>。

下二叠统风城组主要发育在准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷等地,厚度达到800~1 800 m,是一套细粒泥页岩、碳酸盐岩和碱性蒸发岩主的沉积<sup>[36,40]</sup>。天然碱、苏打石等碱性矿物的大量出现证明碱湖的沉积环境,富含藻类的纹层发育支持古气候具有显著的季节节律<sup>[36,40]</sup>。根据岩性特征风城组可以分为三段,以风南7井为例,风城组一段主要发育泥页岩、粉砂岩、白云质泥页岩或粉砂岩,少量碱性蒸发岩以夹层出现;二段主要发育白云质泥页岩、泥质粉砂岩、泥质白云岩,含大量的碱性蒸发岩薄层;三段主要发育泥质白云岩、白云质泥页岩、泥质粉砂岩<sup>[36,41]</sup>(图4)。其中风城组二段和三段界线处发生了沉积相突变,最重要的岩性标志是碱性蒸发岩含量显著降低,表现在测井曲线上是井径测井值突然降低和电阻率测井、密度测井、补偿中子测井值突然升高(图4)。

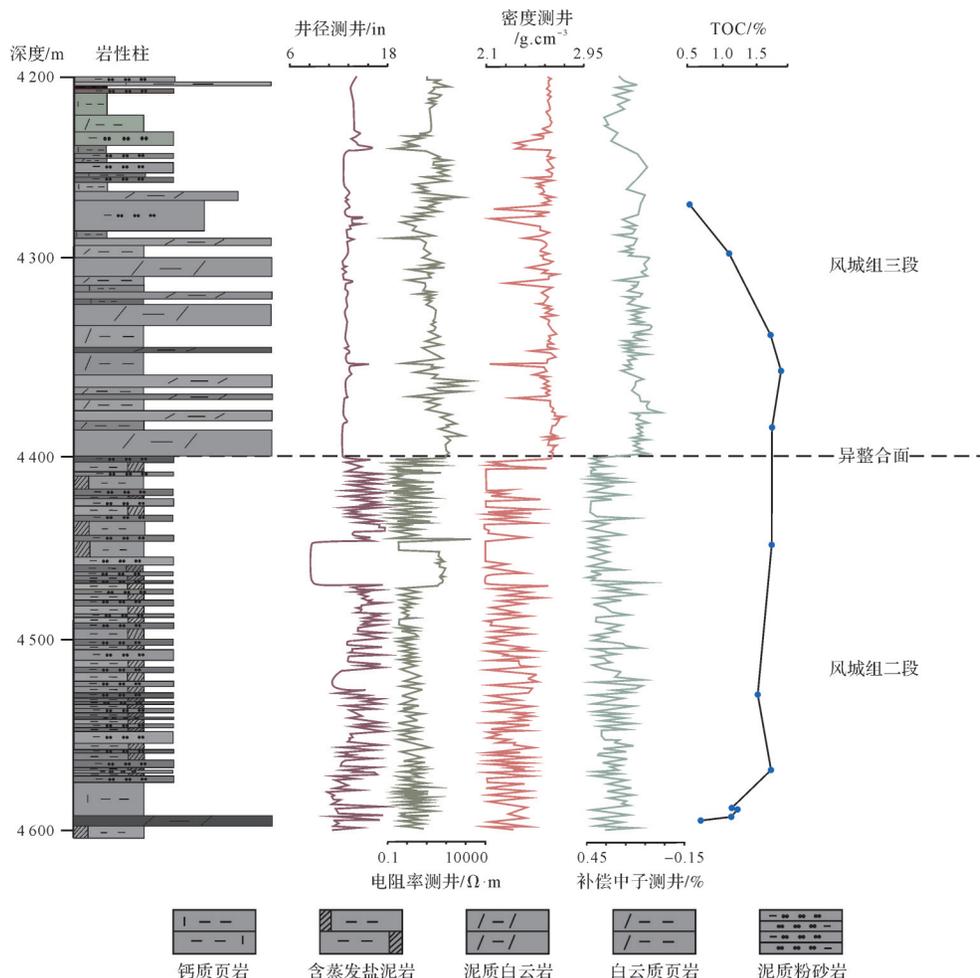


图4 准噶尔盆地二叠系风城组二段—三段界面异整合面(以风南7井为例,据文献[40-41]修改)  
Fig.4 Xenconformity at boundary of Unit 2 and Unit 3 of Fengcheng Formation in the Permian Junggar Basin (FN7 core as an example, modified from references [40-41])

本文认为风城组二段和三段界面很可能是一个异整合面,代表了沉积环境的突然变化。对于风城组碱性蒸发岩的形成环境和机制仍有争议,有代表性的观点包括火山作用或干旱气候导致的湖泊蒸发浓缩、火山作用导致的湖底热液环境以及富含硫酸盐还原菌的湖泊环境等<sup>[40,42-43]</sup>。跨过风城组二段、三段界面的异整合面蒸发盐矿物的显著降低,指示了湖泊水体盐度的快速下降,潜在的环境因素包括气候显著变湿润、河流淡水注入等,但是需要今后更多的沉积学和古气候学研究加以证实。

### 3 海相地层中的异整合面

全球尺度的气候环境剧变才能导致海相异整合面的发育,其特征包括全球主要洋盆沉积环境的等时变化、海相碳同位素偏移、生物灭绝等<sup>[7]</sup>。本节以古近纪古新世—始新世界线异整合面、白垩纪—古近纪界线异整合面、奥陶纪—志留纪界线异整合面、成冰纪—埃迪卡拉纪界线异整合面为例,探讨全球尺度古环境剧变在海相地层中的记录。

#### 3.1 古近纪古新世—始新世界线异整合面

古近纪古新世—始新世之交发生了一次全球性的气候突然变暖事件,地质学家称之为“古新世—始新世极热事件”(PETM, Paleocene-Eocene Thermal

Maximum)<sup>[44-45]</sup>。这次事件导致全球碳循环的重大扰动,海洋和陆地温度在2万年内快速升高了5℃~8℃,大洋环流模式、陆地降水和风化作用改变,以及海洋与陆地生物群生活范围和演化进程的重大改变<sup>[44-46]</sup>。在海相地层中,PETM事件的地层标志包括碳酸盐含量的突然降低和黏土含量的突然升高、碳同位素的显著负偏、底栖有孔虫的灭绝等<sup>[45-46]</sup>。

海相地层中古新统一始新统界面是一个典型的异整合面。沉积环境变化在两万年内发生,并在随后的二十万年内保持稳定<sup>[45,47]</sup>。由于巨量的轻碳在两万年内快速注入地球表层系统,不同介质中的碳同位素均发生显著负偏<sup>[44-45]</sup>。大气和海水中的二氧化碳浓度快速升高,海洋发生酸化作用使得碳酸盐补偿面快速上升,因此在地层中出现碳酸盐含量突然降低和黏土含量突然升高的现象<sup>[46]</sup>。PETM事件期间海洋沉积环境的剧烈变化及其在地层中的记录是古气候剧变的结果,其地层记录却无法用瓦尔特相律来解释。

#### 3.2 白垩纪—古近纪界线异整合面

白垩纪—古近纪界线发生了地质历史上距今最近的一次生物大绝灭事件,这次事件直接导致了包括恐龙在内的多个生物门类灭亡、现生生物类群的出现以及整个地球生态系统的重建(图5)<sup>[48-49]</sup>。发生在距今六千六百万年前的小行星撞击被认为是导致这

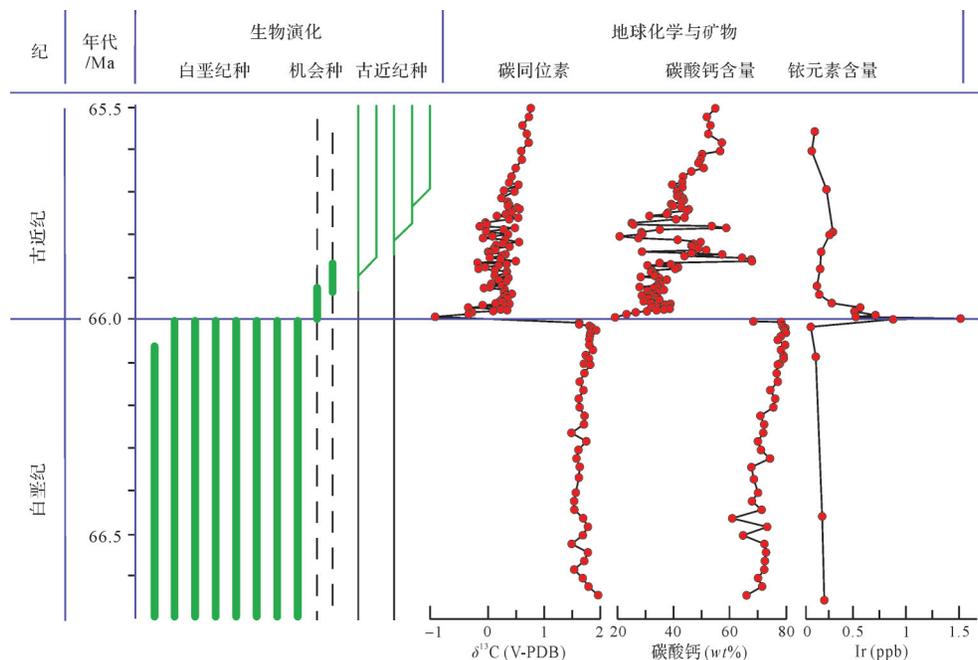


图5 海相地层中白垩纪—古近纪界线异整合面(北大西洋 ODP207 记录,据文献[49]修改)

Fig.5 Xenconformity at Cretaceous-Paleogene boundary in marine strata (record from ODP 207 in North Atlantic, modified from reference [41])

次生物大灭绝的重要原因,尽管也有观点认为德干大火成岩省的喷发对生物灭绝产生了显著影响<sup>[48-51]</sup>。在海相地层中,白垩纪—古近纪界线的典型标志包括铍元素含量异常升高、碳酸盐含量突然降低、碳酸盐碳同位素显著负偏以及多门类海洋生物灭绝<sup>[48]</sup>。

海相地层中白垩系—古近系界面也是一个异整合面。这个界面代表的环境突变发生在小于一千年的时间尺度上,并在随后的几百万年之内变化缓慢<sup>[50-51]</sup>。铍元素含量异常升高普遍被认为是小行星撞击后宇宙尘埃在地层中的记录,由于撞击导致巨量的碳排入大气和海洋,引起海水酸化和酸盐含量突然降低;撞击同时导致多门类海洋生物灭绝和海洋生态系统剧变,并以碳同位素偏移的形式记录在海相地层中(图5)<sup>[48]</sup>。

### 3.3 奥陶纪—志留纪界线异整合面

奥陶纪—志留纪转折期是全球重大地质转折期之一,它是罗迪尼亚超大陆裂解晚期与潘基亚超大陆

聚合早期的过渡阶段,全球海平面发生剧烈变化<sup>[52-53]</sup>(图6)。晚奥陶世末期,冈瓦纳大陆南部发育一定规模冰川作用,伴随着全球温度的显著波动<sup>[54]</sup>。冰期消融过程中全球温度升高,海洋深部富硫化水体的上涌导致广泛的硫化缺氧事件,范围可达陆棚的相对浅水地区<sup>[55]</sup>。一系列快速气候环境变化事件和海洋硫化缺氧事件最终导致了显生宙第一次生物大灭绝事件——奥陶纪末生物大灭绝<sup>[56]</sup>。

海相地层中奥陶系—志留系界面可以认为是一个异整合面。奥陶纪末期冰川融化、气候变暖导致海平面上升和硫化水体上涌,全球性海侵使得硫化缺氧水体广泛分布于大陆边缘,从而在全球范围内(北美、欧洲、中国等)沉积了一套富有机质黑色页岩,是全球古生代最重要的烃源岩层系之一<sup>[8,57]</sup>。我国南方五峰组—龙马溪组页岩层系记录到了这一异整合面,界面之上的龙马溪组底部有机质含量陡然升高,成为重要的页岩气甜点段(图6)<sup>[8]</sup>。

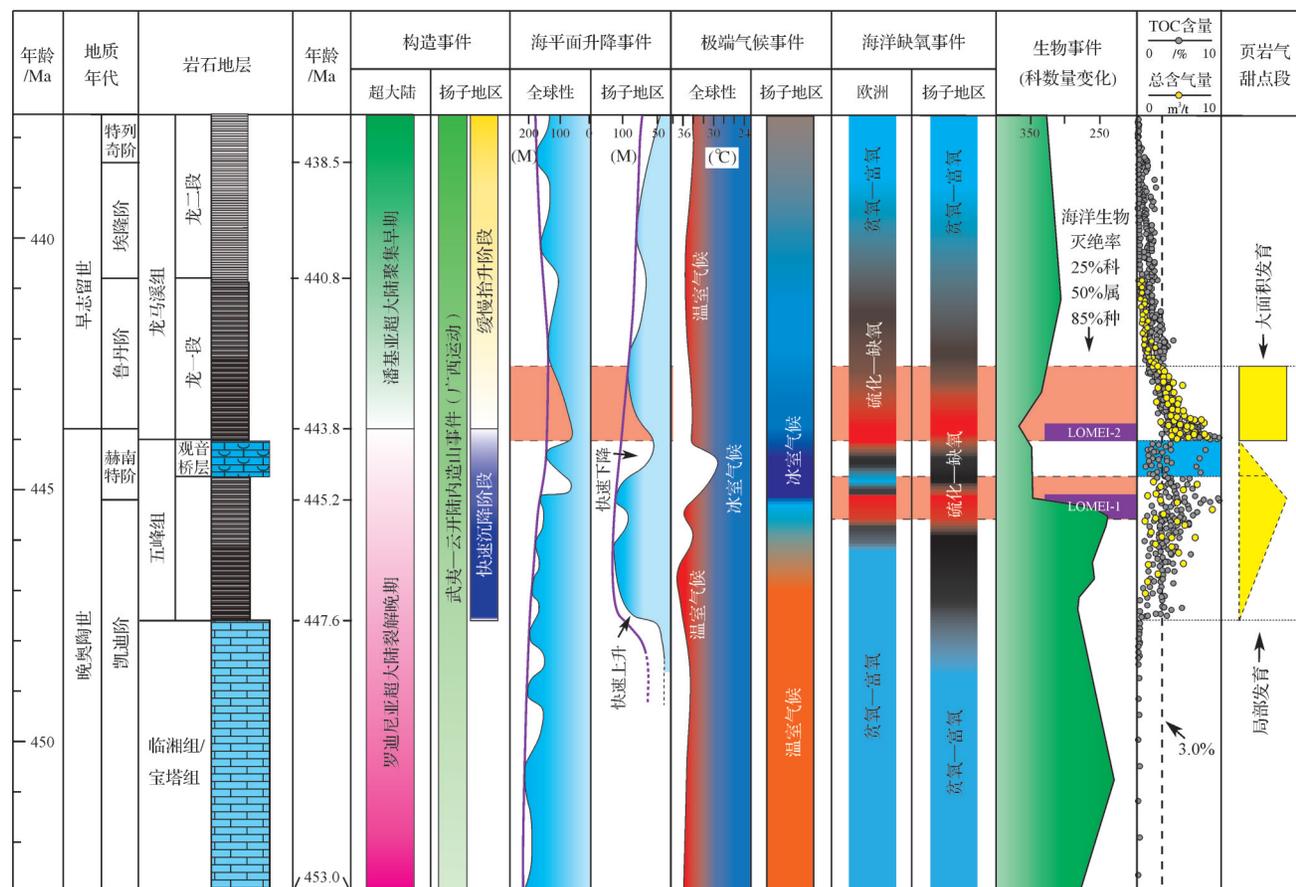


图6 海相地层中奥陶纪—志留纪界线异整合面及其在华南扬子地区的记录(据文献[8]修改)

Fig.6 Xenconformity at Ordovician-Silurian boundary in marine strata and its record in Yangtze area, South China (modified from reference [8])

### 3.4 成冰纪—埃迪卡拉纪界线异整合面

新元古代时期地球上发生了几次显著的冰期事件,由于冰川沉积物在热带地区发育,地质学家提出“雪球地球(Snowball Earth)”假说来形容当时的冰室气候状态<sup>[58-60]</sup>。成冰纪晚期的 Marinoan 冰期即是这样的一次“雪球地球”事件,典型的冰川沉积物如无层理的混杂冰碛岩、冰川坠石沉积等在不同纬度均有发现<sup>[57-59]</sup>。覆盖在冰川沉积物之上的是一套近乎全球分布的、厚度几十厘米到几米、侧向连续的灰岩或白云岩沉积,被称为“盖帽碳酸盐岩(cap carbonate)”<sup>[60-61]</sup>。盖帽碳酸盐岩的底界近乎等时,而且由于其岩性变化太过明显,被国际地层委员会用来作为埃迪卡拉纪的底界<sup>[62]</sup>。

海相地层中的成冰系—埃迪卡拉系界面是一个异整合面。异整合面之下的冰碛岩是寒冷气候下冰川沉积的产物,而覆盖在其上的盖帽碳酸盐岩指示温暖的浅海环境,这种突然的相变无法用瓦尔特相律来解释。反之,地质学家认为是一次全球性的快速变暖事件导致了沉积环境的显著变化,并在随后的百万年时间内保持稳定<sup>[60-61]</sup>。导致埃迪卡拉纪初期快速气候变化的原因仍有争议,主要的观点包括海底天然气水合物的泄露、雪球地球期间风化作用停滞引起大气二氧化碳堆积超过临界浓度等,对这一事件的深入研究为认识地球系统在极端状态下的演化规律提供了一个不能用现代过程类比的全新视角<sup>[60-61,63]</sup>。

## 4 异整合面的研究意义

快速气候变化是当前人类面临的重大科学和社会问题。过去百年气候变化的幅度和速度已经超出了第四纪气候变化的范围,而相似的乃至更强烈的气候变化只有在“深时”出现过<sup>[64-65]</sup>。一方面,这向以现实主义原理为基础的传统地质学提出了挑战,如果深时气候环境剧变在过去几百年从未出现过,地质学家如何“将今论古”;另一方面,这也为深入理解现代和未来气候环境变化提供了机遇,即通过研究深时气候环境剧变“鉴往知来”,为预测未来气候变化提供科学依据。异整合面的概念正是在这样一个大背景下提出的。传统的沉积学和地层学研究通常立足于沉积环境稳定或渐变,而异整合面强调古环境突然的、显著的变化对沉积体系和地层记录的影响,因此这一概念的提出旨在号召地质学家关注地

质历史时期的古环境剧变事件<sup>[7]</sup>。

识别和研究异整合面既有理论研究意义又有生产实践意义。在沉积学和地层学的基础研究中,异整合面的概念有望与整合面、不整合面的概念一样在不同的时空尺度、不同的环境类型中得到应用<sup>[7]</sup>。尤其是在陆相沉积盆地中,沉积体系演化的空间局限性使其更容易响应频繁而剧烈的陆地环境变化,从而发育异整合面。海相不整合面则需要更多的从全球尺度来识别,识别特征包括全球等时的沉积相变化、地球化学指标变化和生物灭绝等。在古环境研究中,异整合面的出现指示了复杂地球系统演化过程中的“临界点(tipping point)”,其本身就是跨越临界点沉积体系对环境剧变的响应,因此准确识别异整合面是认识古环境剧变的重要前提<sup>[7]</sup>。

识别和研究异整合面对于油气资源勘探也具有重要指导意义。油气资源保存的前提是有机质的埋藏和富集,后者又受到古环境剧变事件的直接影响<sup>[16,18]</sup>。特别是全球非常规油气资源沉积富集,与重大地质环境突变密切相关,是全球性或区域性多种地质事件沉积耦合的结果<sup>[8-9,66]</sup>。以古环境剧变事件为标志的异整合面是具有“根本性的、突然的、持续性的”沉积相变,可在盆地至全球尺度上发育连续或准连续分布的非常规油气甜点区(段),即油气富集区(段)<sup>[8]</sup>。本文列举的海相盆地中,奥陶纪—志留纪之交的异整合面对页岩气甜点区(段)具有重要控制作用;而在陆相盆地研究实例中,跨过异整合面有机质的丰度均产生明显变化,正是由于古环境剧变事件引起的生产力和保存条件变化所致。我国广泛发育陆相含油气盆地,进一步识别和研究这些陆相盆地中的异整合面有助于深化前期的勘探认识<sup>[66]</sup>。

异整合面作为一个新生的概念,其涵义仍在发展演化中,其中有些内容也还值得进一步讨论<sup>[7]</sup>。例如,异整合面强调突然的、持续性的沉积相变,那么多快可称之为“突然”?而相变之后保持稳定多久可称为“持续性”?即便如此,异整合面的提出为研究古环境剧变及其地层记录提供了一个新思路,最终时间将会检验它能否融入沉积学和地层学的大家庭。

## 5 结论

本文系统介绍了异整合面的概念和原理,并举例说明陆相和海相地层中的典型异整合面。根本性

的、突然的、持续性的沉积相变是异整合面的特征,而快速的、显著的、不可逆的古环境剧变事件是导致异整合面发育的原因,这决定了此类界面的发育不遵循瓦尔特相律。在陆相沉积盆地中,北美古近系绿河组、松辽盆地白垩系、准噶尔盆地二叠系中代表性的异整合面指示了盆地尺度的古环境剧变。在海相地层中,古近纪古新世—始新世界线、白垩纪—古近纪界线、奥陶纪—志留纪界线、成冰纪—埃迪卡拉纪界线发育的异整合面标志着全球尺度的气候环境剧变。此外,与异整合面相关的古环境剧变事件能够在盆地至全球尺度上影响着有机质沉积富集,是非常规油气沉积学研究的重要内容之一,对寻找非常规油气资源具有重要指导意义。因此,在未来的沉积学、地层学、古环境分析和油气资源勘探实践中,识别和研究异整合面有望兼具理论意义和应用价值。

致谢 感谢中国石油勘探开发研究院邱振和两位审稿人对论文提出的宝贵意见。

## 参考文献(References)

- [1] Walther J. Einleitung in die geologie als historische wissenschaft [M]. Jena, Germany: Gustav Fischer, 1893.
- [2] Middleton G V. Johannes Walther's law of the correlation of facies[J]. GSA Bulletin, 1973, 84(3): 979-988.
- [3] 王成善,李祥辉. 沉积盆地分析原理与方法[M]. 北京:高等教育出版社,2003. [Wang Chengshan, Li Xianghui. Sedimentary basin: From principles to analyses[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. ]
- [4] 陈建强,周洪瑞,王训练. 沉积学及古地理学教程[M]. 北京:地质出版社,2004. [Chen Jianqiang, Zhou Hongrui, Wang Xunlian. Sedimentology and sedimentary palaeogeography[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004. ]
- [5] 朱筱敏. 层序地层学[M]. 东营:石油大学出版社,2000. [Zhu Xiaomin. Sequence stratigraphy[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2000. ]
- [6] Catuneanu O. Principles of sequence stratigraphy[M]. Amsterdam, Boston, Heidelberg: Elsevier, 2006: 375.
- [7] Carroll A R. Xenconformities and the stratigraphic record of paleoenvironmental change [J]. Geology, 2017, 45 (7) : G38952. 1.
- [8] 邱振,邹才能. 非常规油气沉积学:内涵与展望[J]. 沉积学报, 2020,38(1):1-29. [Qiu Zhen, Zou Caineng. Unconventional petroleum sedimentology: Connotation and prospect[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(1): 1-29. ]
- [9] Qiu Z, Zou C N. Controlling factors on the formation and distribution of "sweet-spot areas" of marine gas shales in South China and a preliminary discussion on unconventional petroleum sedimentology [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2020, 194: 103989.
- [10] 刘本培. 地史学教程[M]. 北京:地质出版社,1986. [Liu Benpei. Course of geological history[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986. ]
- [11] Teichert C. Concepts of facies[J]. AAPG Bulletin, 1958, 42 (11): 2718-2744.
- [12] 王清晨. 事件沉积学[J]. 地球科学进展, 1991(3): 90-91. [Wang Qingchen. Event sedimentology[J]. Advances in Earth Science, 1991(3): 90-91. ]
- [13] 龚一鸣,张克信. 地层学基础与前沿[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2007. [Gong Yiming, Zhang Kexin. Basic and frontiers in stratigraphy[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2007. ]
- [14] Dickinson W R, Klute M A, Hayes M J, et al. Paleogeographic and paleotectonic setting of Laramide sedimentary basins in the central Rocky Mountain region[J]. GSA Bulletin, 1988, 100 (7): 1023-1039.
- [15] Smith M E, Carroll A R, Singer B S. Synoptic reconstruction of a major ancient lake system: Eocene Green River Formation, western united states [J]. GSA Bulletin, 2008, 120 (1/2) : 54-84.
- [16] Carroll A R, Bohacs K M. Stratigraphic classification of ancient lakes: Balancing tectonic and climatic controls [J]. Geology, 1999, 27(2): 99-102.
- [17] Doebbert A C, Johnson C M, Carroll A R, et al. Controls on Sr isotopic evolution in lacustrine systems: Eocene Green River Formation, Wyoming [J]. Chemical Geology, 2014, 380: 172-189.
- [18] Bohacs K M, Carroll A R, Neal J E, et al. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: An integrated sequence-stratigraphic-geochemical framework [M]//Gierlowski-Kordesch E H, Kelts K R. Lake basins through space and time. AAPG Studies in Geology 46, 2000:3-34.
- [19] Pietras J T, Carroll A R, Rhodes M K. Lake basin response to tectonic drainage diversion: Eocene Green River Formation, Wyoming [J]. Journal of Paleolimnology, 2003, 30 (2) : 115-125.
- [20] Smith M E, Carroll A R, Jicha B R, et al. Paleogeographic record of Eocene farallon slab rollback beneath western north America[J]. Geology, 2014, 42(12): 1039-1042.
- [21] Rhodes M K, Carroll A R. Lake type transition from balanced-fill to overfilled: Laney member, green river formation, Washakie basin, Wyoming[M]//Smith M E, Carroll A R. Stratigraphy and paleolimnology of the Green River Formation, western USA. Dordrecht: Springer, 2015.
- [22] Roehler H W. Correlation, composition, areal distribution, and thickness of Eocene stratigraphic units, Greater Green River Basin, Wyoming, Utah, and Colorado[R]. USGS Numbered Se-

- ries, 1992.
- [23] Smith M E, Carroll A R, Scott J J. Stratigraphic expression of climate, tectonism, and geomorphic forcing in an underfilled lake basin: Wilkins peak member of the Green River Formation [M]//Smith M E, Carroll A R. Stratigraphy and paleolimnology of the Green River Formation, western USA. Dordrecht: Springer, 2015.
- [24] Feng Z Q, Jia C Z, Xie X N, et al. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao Basin, northeast China[J]. Basin Research, 2010, 22(1): 79-95.
- [25] Wang C S, Feng Z G, Zhang L M, et al. Cretaceous paleogeography and paleoclimate and the setting of SKI borehole sites in Songliao Basin, Northeast China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 385: 17-30.
- [26] 王成善, 冯志强, 王璞珺. 白垩纪松辽盆地松科1井大陆科学钻探工程[M]. 北京: 科学出版社, 2016. [Wang Chengshan, Feng Zhiqiang, Wang Pujun. Initial report of continental scientific drilling project of the Cretaceous Songliao Basin (SK1) [M]. Beijing: Science Press, 2016.]
- [27] Gao Y, Wang C S, Wang P J, et al. Progress on continental scientific drilling project of Cretaceous Songliao Basin (SK-1 and SK-2)[J]. Science Bulletin, 2019, 64(2): 73-75.
- [28] 程日辉, 王国栋, 王璞珺, 等. 松科1井南孔白垩系姚家组沉积序列精细描述: 岩石地层、沉积相与旋回地层[J]. 地学前缘, 2009, 16(2): 272-287. [Cheng Rihui, Wang Guodong, Wang Pujun, et al. Description of cretaceous sedimentary sequence of the Yaojia Formation recovered by CCSD-SK-1s borehole in Songliao Basin: Lithostratigraphy, sedimentary facies and cyclic stratigraphy [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(2): 272-287.]
- [29] 高有峰, 王璞珺, 程日辉, 等. 松辽盆地松科1井上白垩统嫩江组一、二段沉积序列厘米级精细刻画: 岩性·岩相·旋回[J]. 地学前缘, 2011, 18(6): 195-217. [Gao Youfeng, Wang Pujun, Cheng Rihui, et al. Centimeter-scale sedimentary sequence description of Upper Cretaceous Nenjiang Formation (Lower numbers 1&2): Lithostratigraphy, facies and cyclostratigraphy, based on the scientific drilling (SK1) borehole in the Songliao Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(6): 195-217.]
- [30] Xi D P, Wang X Q, Feng Z Q, et al. Discovery of Late Cretaceous foraminifera in the Songliao Basin: Evidence from SK-1 and implications for identifying seawater incursions [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(6): 253-256.
- [31] Chamberlain C P, Wan X Q, Graham S A, et al. Stable isotopic evidence for climate and basin evolution of the Late Cretaceous Songliao Basin, China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 385: 106-124.
- [32] Hu J F, Peng P A, Liu M Y, et al. Seawater incursion events in a Cretaceous paleo-lake revealed by specific marine biological markers[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 9508.
- [33] Ji L M, Zhang M Z, Song Z G. The palynological record from Coniacian to Lower Campanian continental sequences in the Songliao Basin, northeastern China and its implications for palaeoclimate[J]. Cretaceous Research, 2015, 56: 226-236.
- [34] Gao Y, Xi D P, Qin Z H, et al. Clay mineralogy of the first and second members of the Nenjiang Formation, Songliao Basin: Implications for paleoenvironment in the Late Cretaceous [J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(3): 327-338.
- [35] Graham S A, Hendrix M S, Wang L B, et al. Collisional successor basins of western China: Impact of tectonic inheritance on sand composition [J]. GSA Bulletin, 1993, 105(3): 323-344.
- [36] 支东明, 唐勇, 郑孟林, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油藏地质特征与成藏控制因素[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 615-623. [Zhi Dongming, Tang Yong, Zheng Menglin, et al. Geological characteristics and accumulation controlling factors of shale reservoirs in Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 615-623.]
- [37] Han Y G, Zhao G C. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern Central Asian Orogenic Belt: Constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean [J]. Earth-Science Reviews, 2018, 186: 129-152.
- [38] Gao Y, Huang H, Tao H F, et al. Paleoenvironmental setting, mechanism and consequence of massive organic carbon burial in the Permian Junggar Basin, NW China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2020, 194: 104222.
- [39] 陈建平, 王绪龙, 邓春萍. 准噶尔盆地油气源、油气分布与油气系统[J]. 地质学报, 2016, 90(3): 421-450. [Chen Jianping, Wang Xulong, Deng Chunping. Oil and gas source, occurrence and petroleum system in the Junggar Basin, Northwest China [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(3): 421-450.]
- [40] 曹剑, 雷德文, 李玉文, 等. 古老碱湖优质烃源岩: 准噶尔盆地下二叠统风城组[J]. 石油学报, 2015, 36(7): 781-790. [Cao Jian, Lei Dewen, Li Yuwen, et al. Ancient high-quality alkaline lacustrine source rocks discovered in the Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 36(7): 781-790.]
- [41] Gao G, Yang S R, Ren J L, et al. Geochemistry and depositional conditions of the carbonate-bearing lacustrine source rocks: A case study from the Early Permian Fengcheng Formation of Well FN7 in the northwestern Junggar Basin [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 162: 407-418.
- [42] 余宽宏, 操应长, 邱隆伟, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷早二叠世风城组沉积时期古湖盆卤水演化及碳酸盐矿物形成机理[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(7): 1248-1263. [Yu Kuanhong, Cao Yingchang, Qiu Longwei, et al. Brine evolution of ancient lake and mechanism of carbonate minerals during the sedimentation of Early Permian Fengcheng Formation in Mahu Depression, Junggar Basin, China [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(7): 1248-1263.]

- [43] 张元元,李威,唐文斌. 玛湖凹陷风城组碱湖烃源岩发育的构造背景和形成环境[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(1): 48-54. [Zhang Yuanyuan, Li Wei, Tang Wenbin. Tectonic setting and environment of alkaline lacustrine source rocks in the Lower Permian Fengcheng Formation of Mahu Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(1): 48-54.]
- [44] 赵玉龙,刘志飞. 古新世—始新世最热事件对地球表层循环的影响及其触发机制[J]. 地球科学进展, 2007, 22(4): 341-349. [Zhao Yulong, Liu Zhifei. The impacts of the Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM) event on earth surface cycles and its trigger mechanism[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(4): 341-349.]
- [45] McInerney F A, Wing S L. The Paleocene-Eocene thermal maximum: A perturbation of carbon cycle, climate, and biosphere with implications for the future[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2011, 39(1): 489-516.
- [46] Zachos J C, Röhl U, Schellenberg S A, et al. Rapid acidification of the ocean during the Paleocene-Eocene thermal maximum [J]. Science, 2005, 308(5728): 1611-1615.
- [47] Murphy B H, Farley K A, Zachos J C. An extraterrestrial  $^3\text{He}$ -based timescale for the Paleocene - Eocene thermal maximum (PETM) from Walvis Ridge, IODP Site 1266 [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, 74(17): 5098-5108.
- [48] Hull P M, Bornemann A, Penman D E, et al. On impact and volcanism across the Cretaceous-Paleogene boundary [J]. Science, 2020, 367(6475): 266-272.
- [49] Schulte P, Alegret L, Arenillas I, et al. The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary [J]. Science, 2010, 327(5970): 1214-1218.
- [50] Schoene B, Eddy M P, Samperton K M, et al. U-Pb constraints on pulsed eruption of the Deccan Traps across the End-Cretaceous mass extinction [J]. Science, 2019, 363(6429): 862-866.
- [51] Sprain C J, Renne P R, Vanderkluisen L, et al. The eruptive tempo of Deccan volcanism in relation to the Cretaceous-Paleogene boundary [J]. Science, 2019, 363(6429): 866-870.
- [52] Blakey R C. Gondwana paleogeography from assembly to breakup-A 500 m. y. odyssey [M]//Fielding C R, Frank T D, Isbell J L. Resolving the Late Paleozoic ice age in time and space. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 2008: 1-28.
- [53] Nance R D, Murphy J B, Santosh M. The supercontinent cycle: A retrospective essay [J]. Gondwana Research, 2014, 25(1): 4-29.
- [54] Finnegan S, Bergmann K, Eiler J M, et al. The magnitude and duration of Late Ordovician-Early Silurian glaciation [J]. Science, 2011, 331(6019): 903-906.
- [55] Hallam A, Wignall P B. Mass extinctions and sea-level changes [J]. Earth-Science Reviews, 1999, 48(4): 217-250.
- [56] 戎嘉余,黄冰. 生物大灭绝研究三十年 [J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2014, 44(3): 377-404. [Rong Jiayu, Huang Bing. Study of Mass Extinction over the past thirty years: A synopsis [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2014, 44(3): 377-404.]
- [57] 张元东,詹仁斌,甄勇毅,等. 中国奥陶纪综合地层和时间框架 [J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2019, 49(1): 66-92. [Zhang Yuandong, Zhan Renbin, Zhen Yongyi, et al. Ordovician integrative stratigraphy and timescale of China [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2019, 49(1): 66-92.]
- [58] Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al. A neoproterozoic snowball earth [J]. Science, 1998, 281(5381): 1342-1346.
- [59] 储雪蕾. 新元古代的“雪球地球” [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(3): 233-238. [Chu Xuelei. "Snowball Earth" During the Neoproterozoic [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2004, 23(3): 233-238.]
- [60] 冯东,陈多福,刘芊. 新元古代晚期盖帽碳酸盐岩的成因与“雪球地球”的终结机制 [J]. 沉积学报, 2006, 24(2): 235-241. [Feng Dong, Chen Duofu, Liu Qian. Formation of Late Neoproterozoic cap carbonates and termination mechanism of "Snowball Earth" [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(2): 235-241.]
- [61] Yu W C, Algeo T J, Zhou Q, et al. Cryogenian cap carbonate models: A review and critical assessment [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, 552: 109727.
- [62] Knoll A, Walter M, Narbonne G, et al. The Ediacaran period: A new addition to the geologic time scale [J]. Lethaia, 2006, 39(1): 13-30.
- [63] 蒋干清,史晓颖,张世红. 甲烷渗漏构造、水合物分解释放与新元古代冰后期盖帽碳酸盐岩 [J]. 科学通报, 2006, 51(10): 1121-1138. [Jiang Ganqing, Shi Xiaoying, Zhang Shihong. Methane seeps, methane hydrate destabilization, and the Late Neoproterozoic postglacial cap carbonates [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(10): 1121-1138.]
- [64] 孙枢,王成善. “深时”(Deep Time)研究与沉积学 [J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 792-801. [Sun Shu, Wang Chengshan. Deep time and sedimentology [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 792-801.]
- [65] 王成善,王天天,陈曦,等. 深时古气候对未来气候变化的启示 [J]. 地学前缘, 2017, 24(1): 1-17. [Wang Chengshan, Wang Tiantian, Chen Xi, et al. Paleoclimate implications for future climate change [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(1): 1-17.]
- [66] Zou C N, Zhu R K, Chen Z Q, et al. Organic-matter-rich shales of China [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 189: 51-78.

## Xenocomformity: A stratigraphic surface representing fundamental and abrupt paleoenvironmental change

GAO Yuan<sup>1</sup>, CARROLL Alan R.<sup>2</sup>, WANG ChengShan<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2. Department of Geoscience, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin 53706, USA

**Abstract:** A xenoconformity is a stratigraphic surface or gradational interval that records a fundamental, abrupt, and persistent change in sedimentary facies across basinal to global scales. Different from traditional concepts of stratigraphic surfaces which are on the premise that the depositional environments either have not changed appreciably through time, or else have changed very slowly, xenoconformities emphasize relatively rapid, comprehensive paleoenvironmental changes, and therefore do not follow the classic “Walther’s law”. Continental environments are of great varieties and of high-amplitude changes, and favor the formation of xenoconformities. Examples of continental xenoconformities include those in Paleogene Greenriver Formation, in Cretaceous Songliao Basin and in Permian Junggar Basin. Marine xenoconformities represent paleoclimatic and paleoenvironmental events at global scale, including those at Paleocene-Eocene boundary, at Cretaceous-Paleogene boundary and at Cryogenian-Ediacaran boundary. We expect researches on xenoconformities could be of help on interpreting major paleoenvironmental tipping points and their responses in stratigraphic records. Furthermore, as paleoenvironmental changes control processes of organic matter burial, researches on xenoconformities could also help petroleum exploration.

**Key words:** xenoconformity; paleoenvironment; paleoclimate; sedimentary geology; stratigraphy