

引用格式:余继峰,乔文彦,赵秀丽,等.山旺盆地:记录“深时”气候的时间胶囊[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(5):1-8.

YU Jifeng, QIAO Wenyan, ZHAO Xiuli, et al. Shanwang basin: A time capsule recording the “Deep Time” climate[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(5): 1-8.

# 山旺盆地:记录“深时”气候的时间胶囊

余继峰<sup>1</sup>, 乔文彦<sup>1</sup>, 赵秀丽<sup>1</sup>, 蒋宗凯<sup>1</sup>, 张典栋<sup>1</sup>, 曹慧涛<sup>1</sup>, 赵 刚<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东山旺国家地质公园, 山东 临朐 262600)

**摘 要:**山旺盆地山旺组硅藻页岩段沉积连续性好,记录着中新世古气候信息,是深时古气候变化研究的理想素材。本研究对该目标层段进行了野外地质剖面实测及物化指标测量,测点间距 5 cm。在已有绝对地质年龄框架约束下,运用 Laskar 北纬 65°盛夏的太阳辐射曲线对实测磁化率曲线进行调谐,获得高分辨率达 10 kyr 的时间标尺。在该时间标尺下,运用实测 Rb/Sr 值和磁化率等气候替代指标对硅藻页岩段的古气候变化特征进行了分析。认为硅藻页岩段古气候由老到新分为三个演化阶段,在整体温暖潮湿的背景下,也有小尺度冷暖干湿的变化,共识别出十二个气候波动期,分辨率可达千年级别。

**关键词:**山旺盆地;深时;硅藻页岩;时限;古气候特征

中图分类号:P532

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2019)05-0001-08

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2019.05.001

## Shanwang basin: A time capsule recording the “Deep Time” climate

YU Jifeng<sup>1</sup>, QIAO Wenyan<sup>1</sup>, ZHAO Xiuli<sup>1</sup>, JIANG Zongkai<sup>1</sup>,

ZHANG Diandong<sup>1</sup>, CAO Huitao<sup>1</sup>, ZHAO Gang<sup>2</sup>

(1.College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao,

Shandong 266590, China; 2.Shandong Shanwang National Geopark, Linqu, Shandong 262600, China)

**Abstract:** The diatom shale section of Shanwang Formation in Shanwang basin has stable sedimentary continuity and recording of the Miocene paleoclimatic information is accomplished. This provides ideal material for “Deep-Time” paleoclimatic change research. In this study, the field geological section and the physical and chemical indicators were measured for the target interval. The spacing between measure points was 5 cm. Under the constraints of absolute geological age framework, the measured magnetic susceptibility curve was tuned using the solar insolation curve of the north latitude 65° summer from Laskar to obtain a time scale with a resolution as high as 10 kyr. Under this time scale, the paleoclimate characteristics of the diatom shale section were analyzed using the measured climate proxies such as Rb/Sr value and magnetic susceptibility. It is believed that the paleoclimate of the diatom shale section is divided into three evolution stages from old to new. Under the overall warm and humid background, there are also small-scale changes in temperature, humidity and wetness. A total of 12 climatic fluctuation periods were identified, and the resolution is of up to Millennium level.

**Key words:** Shanwang basin; Deep-Time; diatomite; time limit; paleo-climatic characteristics

收稿时间:2019-01-25

基金项目:国家自然科学基金项目(41472092)

作者简介:余继峰(1964—),男,安徽萧县人,教授,博士生导师,主要从事沉积学、旋回地层学方面的研究。

E-mail: yujifeng05@163.com

“深时”(Deep Time)古气候研究计划由以美国 Oklahoma 大学 Soreghan 教授<sup>[1]</sup>为代表的古气候研究学者提出,着眼于利用沉积记录研究前第四纪地质历史时期的地球古气候变化,为未来气候预测提供更可靠依据,而前第四纪的气候变化由于只受自然因素控制,更能反映地球气候系统的规律。深时古气候研究的关键不仅是记录高分辨率、高连续性古气候变化的地质材料,而且地质材料的时限应当尽可能精确可靠。

山旺盆地是新近纪中新世时期形成的一个小型玛珥湖盆地。Holden<sup>[2]</sup>曾受邀在《Science》上撰文介绍了山旺盆地:大约 25 Ma 年前中国山东省的一个湖泊停止循环变成一粒时间胶囊。在几百万年的时间内大量动植物落入缺氧的湖水中被细粒沉积物覆盖埋藏”。时间胶囊一词形象地将山旺盆地的特点表达了出来,即小而完整。因其独特的沉积环境形成和保存了高分辨率沉积记录,特别是山旺组沉积连续、含化石丰富的硅藻页岩段,其顶底均为玄武岩层所界定,为同位素测年提供了方便,为“深时”的研究、反演古气候变化提供了理想材料和场地,为该区高分辨率区域性古气候变化研究提供了条件。

目前在山旺盆地成因与演化、山旺组化石的分类与保存、山旺盆地古地理等方面研究较多,有关古生物化石方面研究尤为突出。在古气候研究方面也有不少成果问世,但多是根据古生物化石对山旺组形成时期作整体气候判断,如赵秀丽等<sup>[3]</sup>运用共存因子分析法对山旺盆地山旺组孢粉植物群定量化研究,不同孢粉组合中孢粉类型和含量的变化反映了山旺盆地山旺组古气候由亚热带的暖湿期向温凉期过渡;孙启高等<sup>[4]</sup>应用叶相分析法恢复了山旺盆地硅藻泥页岩部分层段的古气候信息,表明山旺盆地中新世古气候为温暖潮湿的温带至亚热带气候;阎德发等<sup>[5]</sup>根据山旺所产的 21 种哺乳动物化石推断出山旺盆地山旺组气候为亚热带或暖温带气候;赵秀丽等<sup>[6]</sup>新发现的两种植物化石证实了山旺地区早中新世晚期阔叶植物与针叶植物共存的面貌,反映了该地区亚热带山地气候类型。上述研究均认为山旺盆地山旺组形成期总体为温暖潮湿气候,但对其历经的百万年时限内气候如何变化并未涉及。

本研究选用磁化率及 Rb/Sr 值作为气候替代指标进行深时气候研究。对剖面山旺组硅藻页岩段 21.81 m 地层采用微型磁导率仪 KT-6 及 Niton XL3t 950 手持式矿石分析仪进行物化指标连续高分辨率测量,测量间距为 5 cm。运用文献<sup>[7]</sup>的方法对实测磁化率曲线进行调谐,获得高分辨率时间标尺,并结合剖面实测 Rb/Sr 值和磁化率等气候替代指标对山旺组硅藻页岩段的古气候变化进行解读。

## 1 盆地地质特征

山旺盆地位于山东省临朐县城以东 22 km 处,盆地面积小于 1 km<sup>2</sup>,四周丘陵环抱(图 1)。山旺盆地因其中的硅藻页岩发育、动植物化石门类众多、保存精美,被称为“万卷书”、“化石宝库”,并被中外专家誉为研究中新世的“综合实验室”。山旺国家地质公园于 2005 年 9 月 24 日揭牌开园后,2011 年被确定为国土资源部第一批野外科学观测研究基地。

山旺盆地的发展经历了完整的 3 个阶段,并相应地形成了 3 个结构层。在盆地接受堆积阶段,初期处于封闭环境,中、晚期为半封闭环境。虽与火山活动有关,但其并不是一个简单的火山口盆地,种种迹象表明,是一个玛珥湖(Maar lake)盆地<sup>[8]</sup>。

山旺盆地出露的地层具有一老一新的特点。老地层为太古界泰山群万家庄组,其代表性岩石为花岗质片麻岩,分布在该区西南部;新地层主要为新近纪基性火山岩及其沉积夹层。对于本区出露的新近系,现在人们多趋

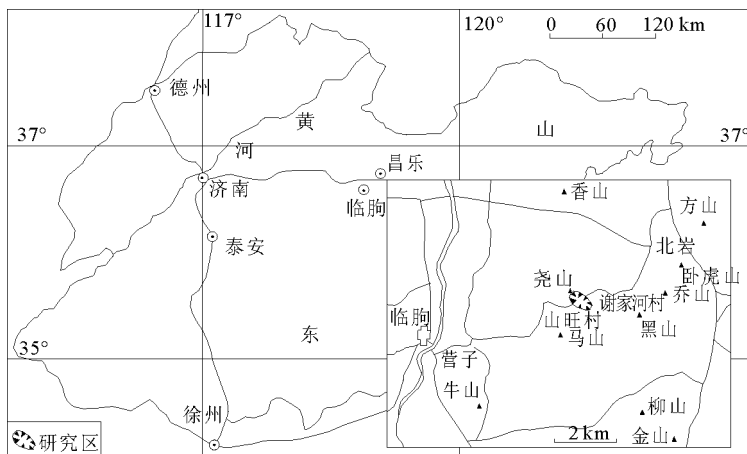


图 1 山旺盆地地理位置图

Fig. 1 The geographical map of Shanwang basin

向于三分法,以山东区域地层表为代表,将本区地层自下而上分别划归牛山组、山旺组和尧山组<sup>[9]</sup>(图 2)。山旺组是一套发育于牛山组玄武岩基底之上的淡水湖泊沉积,也是本区最主要的化石产出层位。主要包括三个部分:下部为黄色砂岩和凝灰质角砾岩,仅在角岩山南麓等盆地边缘地带出现,与牛山组不整合接触,砂岩中曾发现中新世脊椎动物化石;中部为灰白色硅藻页岩,夹多层凝灰岩、磷结核层和泥灰岩层,硅藻页岩富产多种门类的化石(硅藻、孢粉、植物、昆虫、鱼类、两栖动物、爬行动物、鸟类和哺乳动物等),上部为绿色泥岩、褐色碳质泥岩,夹两层玄武岩,顶部砂砾岩。

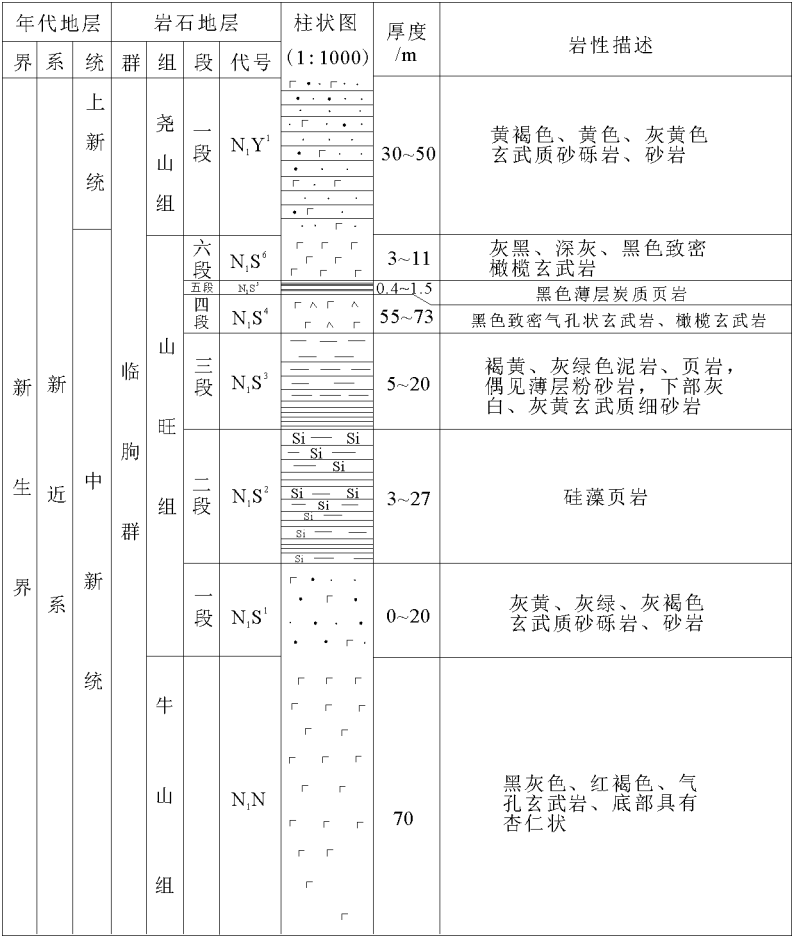


图 2 山旺新近系综合柱状图

Fig. 2 The composite columnar section of Neogene period of Shanwang

2 时间标尺建立

山旺盆地形成于前第四纪的中新世。不少学者针对山旺盆地地层的沉积时间做过研究。采用余继峰等<sup>[10]</sup>在贺怀宇等<sup>[11]</sup><sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 同位素测年框架约束下,对山旺组硅藻页岩段及上下玄武岩层古地磁极性分析得到的时限结果,即年代跨度约为 18.524~18.056 MaB.P.(图 3(a))。

为了取得山旺组硅藻页岩段高分辨率时间标尺,将实测磁化率数据作为天文调谐的主要信号源,在上述年代框架约束下,运用 Laskar 等<sup>[7]</sup>应用斜率和岁差模拟的北纬 65°盛夏的太阳辐射曲线进行调谐。磁化率的极大值与其极小值相比,极大值通常不受背景噪音的影响,因而调谐时常选择磁化率极大值点作为年龄的控制点。虽存在两种相反的调谐方案,即将磁化率极大值分别与北半球天文辐射的极小值或极大值对应,而且两种调谐方法产生的相位差在可容忍的误差范围内。但有研究表明,采用磁化率的极大值与太阳辐射的

极小值相对应的调谐方案更合理<sup>[12]</sup>,因此采用该调谐方案得到高分辨率时间标尺以及剖面深度与年代对应关系(图 3(b)、表 1)。该时间标尺的分辨率可达 10 kyr。

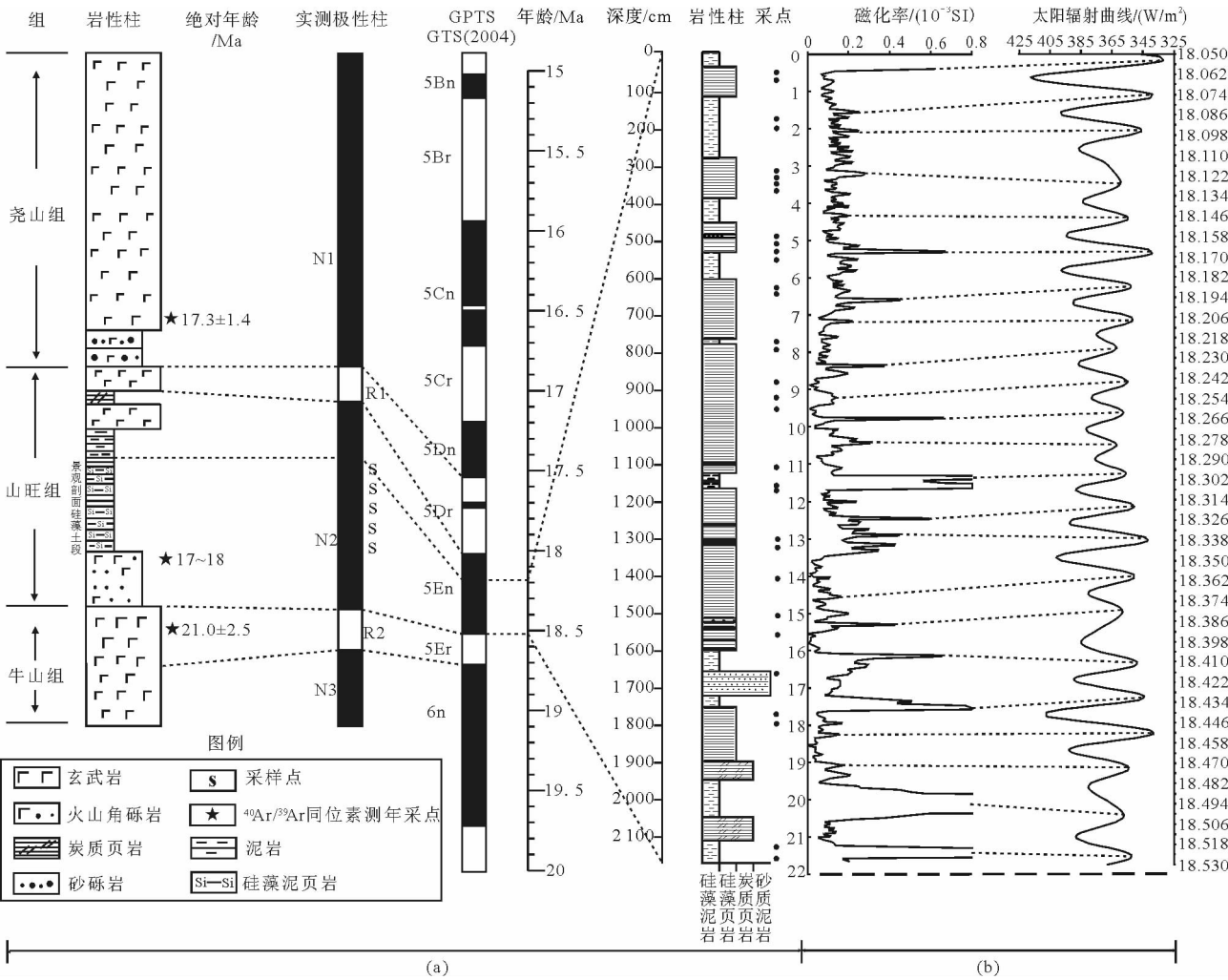


图 3 山旺组综合时间标尺

Fig. 3 The composite time scale of Shanwang formation

表 1 山旺硅藻页岩剖面深度与年代对应关系

Tab. 1 The corresponding relationship between depth and time profile of diatomite					
深度/m	年代/Ma	深度/m	年代/Ma	深度/m	年代/Ma
1.5	18.074	8.4	18.224	15.3	18.380
2.0	18.094	9.2	18.244	16.2	18.410
3.2	18.126	10.4	18.281	17.6	18.430
4.3	18.146	11.4	18.298	18.3	18.452
5.2	18.168	12.5	18.318	19.1	18.472
6.6	18.187	13.0	18.338	20.2	18.494
7.2	18.207	14.6	18.359	21.6	18.524

### 3 气候替代指标的确定

在古气候研究中,沉积物磁化率为恢复古气候的良好替代指标。磁化率对气候极为敏感,被广泛应用于古气候的解读。不同气候条件下形成的沉积物,其磁化率与古气候之间的关系并不固定,因此研究同一剖面气候意义明确的指标与磁化率的对应关系,是判别湖泊沉积物磁化率古气候意义的有效手段<sup>[13]</sup>。湖泊沉积物中 Rb/Sr 值常用来恢复湖泊沉积时的古气候、古环境,一般认为高 Rb/Sr 值常指示冷干条件下较弱的化学风化强度,低 Rb/Sr 值常用来指示温湿条件下较强的化学风化强度。这是由于 Rb 主要赋存于不易被风化的矿物中,且易被粘土矿物吸附而留在原地,而 Sr 则主要赋存于易被风化的矿物中,容易以  $\text{Sr}^{2+}$  形式被化学淋溶搬运至湖盆<sup>[14]</sup>。山旺盆地山旺组硅藻页岩段磁化率高值主要出现在黄绿色泥岩层,该层 Rb/Sr 值也处于相对高值,代表着化学风化强度较弱的冷干气候,这与黄绿色泥岩中存在的植物孢粉组合所反映的相对干旱气候相对应<sup>[15]</sup>。另外,在封闭性湖泊或玛珥湖沉积物中,物源输入主要靠降雨冲刷裸露湖壁提供。当气候干燥时,湖面高度下降,裸露湖壁的面积增加,湖壁植被覆盖较差,即使较小的降水也会将湖壁大量的碎屑物质带入湖盆,磁性矿物也会随之增加,最终导致磁化率增加<sup>[16]</sup>。从上述分析可知,山旺盆地山旺组硅藻泥页岩,磁化率高值主要反映的是相对干旱的气候条件,磁化率低值反映的是相对湿润的气候条件,与 Rb/Sr 值的指示意义相印证。

### 4 古气候特征解读

#### 4.1 Rb/Sr 值与古气候

Rb/Sr 值的高低与化学风化强度呈负相关关系,即代表化学风化强度高的低 Rb/Sr 值与暖湿气候有关,而高 Rb/Sr 值与冷干气候有关。根据山旺组硅藻页岩段 Rb/Sr 值的变化特征,将剖面自下而上划分为 I、II、III 三个阶段,即下部的高值区 I、中部的低值区 II 以及上部的中值区 III。阶段 I 的时限为 18.524~18.407 MaB.P.(0.117 Ma),其 Rb/Sr 值整体高于阶段 II、阶段 III,说明该阶段化学风化强度弱,推测气候偏冷干。阶段 II 时限为 18.407~18.205 MaB.P.(0.202 Ma),Rb/Sr 值整体较低,反映了化学风化强度强,相对炎热湿润的气候,该阶段气温相对较高,降雨量充足,湖泊水体较深,硅藻大量繁殖,沉积物中硅藻壳体含量较高,主要沉积具有纹层结构的硅藻页岩。阶段 III 时限为 18.205~18.056 MaB.P.(0.149 Ma),Rb/Sr 值整体较阶段 II 略有增高,表示该阶段化学风化强度减弱,应为相对温暖潮湿的气候阶段(图 4)。

#### 4.2 磁化率与古气候

山旺盆地硅藻页岩段磁化率整体较低,平均为  $0.27 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,变化范围为  $0.02 \times 10^{-3} \sim 5.15 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,根据磁化率特征将上述三个阶段划分为 12 个亚段,分别是 I a-I f、II a-II c 及 III a-III c 亚段。其中,阶段 I 磁化率值高低波动频繁,其中亚段 I a(9 kyr)、I c(18 kyr)、I e(5 kyr)磁化率值极高,指示了降雨量较少,相对冷干气候,气候冷干不宜硅藻繁殖;I a、I c、I e 亚段对应时期主要沉积黄绿色泥岩;I b(15 kyr)、I d(51 kyr)亚段磁化率值较低,说明了降雨量增加,为相对冷湿的气候。阶段 II 磁化率值整体较低,指示了降雨量较多,相对炎热湿润的气候,该阶段存在短暂的冷干气候波动段——II b 亚段(10 kyr)。阶段 III 磁化率值整体较阶段 II 略有增高,降雨量减少,应为相对潮湿的气候阶段,而 III b(9 kyr)亚段磁化率值较高,指示了降雨量减少,相对冷干气候,持续时间短暂(图 4)。

#### 4.3 化石与古气候

在山旺盆地山旺组硅藻页岩中已发现真菌、硅藻、介形虫、孢粉、昆虫、鱼类、两栖动物、爬行类、鸟类、哺乳动物及遗迹化石等十几个门类的化石,共计 400 余属 700 多个种<sup>[17]</sup>。无论植物还是动物化石,均反映出该地层沉积时的气候属于温带至亚热带的温暖湿润型气候,总体温湿条件适宜,动植物生长繁盛。应用微体古生物化石进行该地层古气候分析,分辨率最高的研究成果应是梁明媚等<sup>[18]</sup>通过孢粉样品分析得到的古气候变化成果,该成果根据孢粉组合特征将研究剖面自下而上划分出 5 个“混交中生林”发育阶段:①湿润环境下的混交中生林,②干旱环境下的混交中生林,③湿润湖岸环境下的混交中生林,④山地、湿润及碱性环境下的混交中生林和⑤碱性环境下的混交中生林。研究发现本文磁化率和 Rb/Sr 值解读的气候变化与山旺组硅

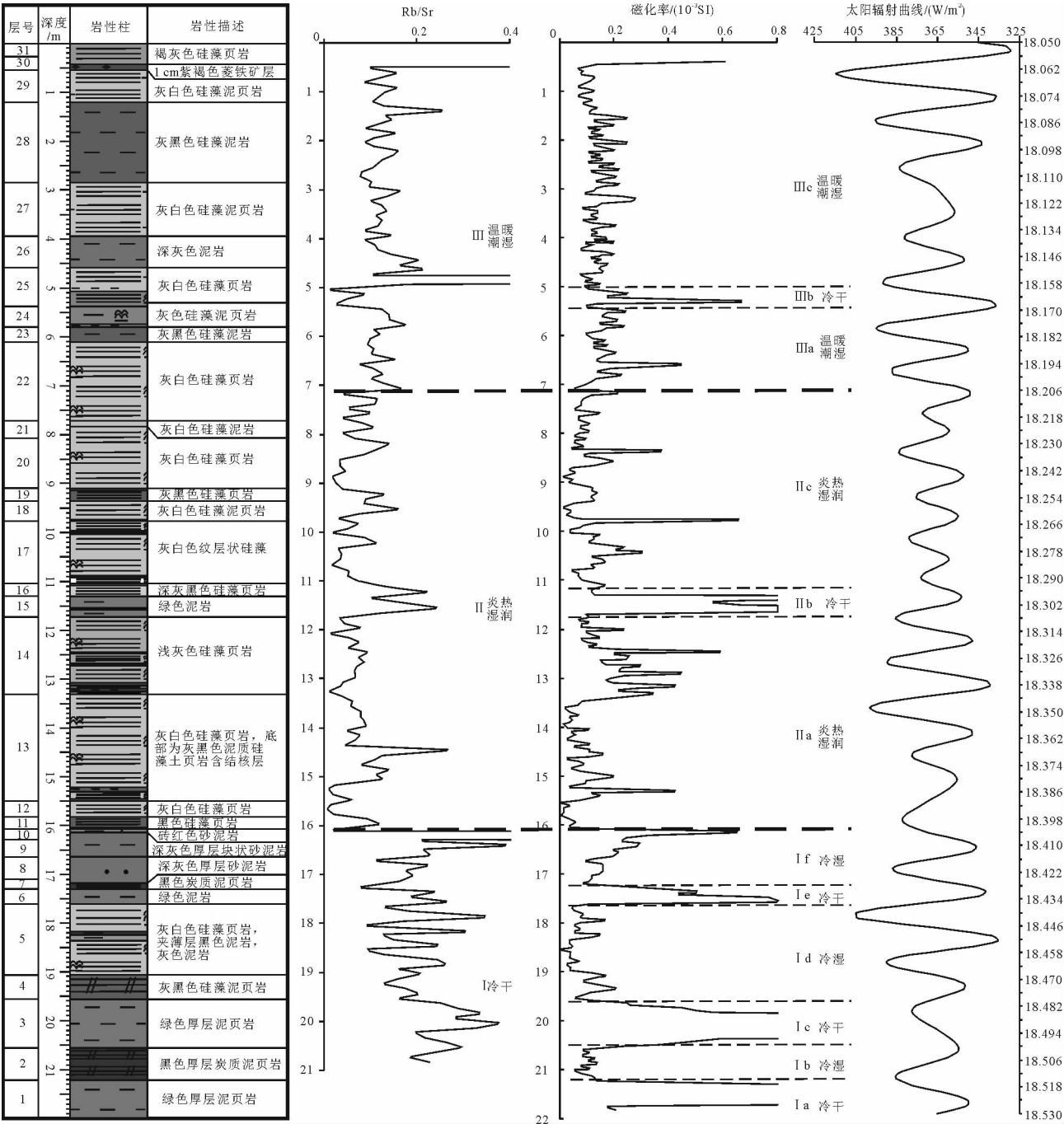


图 4 山旺组硅藻页岩段辐射曲线调谐时间标尺下磁化率、Rb/Sr 变化特征与古气候

Fig. 4 The properties of magnetic susceptibility, the ratio of Rb/Sr and paleoclimate of diatomaceous shale section of Shanwang formation under the time scale tuned with insolation curve

藻页岩段孢粉特征阐明的古气候变化具有较高的一致性。其阶段 1 与亚段 I d 相当,均指示相对湿润的气候;阶段 2 与亚段 I e、I f 相当,反映的古气候信息吻合,指示相对干旱的气候;阶段 3 与阶段 II 相当,整体为湿润的气候;阶段 4 与阶段 III 吻合,整体为相对较湿润的气候。在该大尺度古气候变化背景下,解读出多次短暂冷干气候事件。需要说明的是梁明媚等<sup>[18]</sup>与研究剖面的层位不完全一致,本次研究在剖面下部挖掘较深,深于上述①湿润环境下的混交中生林层位,而上部由于多年冲刷破坏缺失了上述“⑤碱性环境下的混交中生林”层位。为进一步验证结果的可靠性,还对剖面不同层位样品中硅藻化石进行了提纯、种属鉴定及环

境分析。如第 12 层硅藻页岩(15.5~15.8 m)的硅藻几乎全部为直链藻属,主要为冰岛直链藻、颗粒直链藻及弯曲变种(图 5(a)和图 5(b)),为淡水浮游类型,反映较深的水体,与前述Ⅱa湿润的古气候特征吻合;第 24 层硅藻泥岩(5.6~5.8 m)的硅藻含直链藻属(图 5(c)),反映较深的水体,与前述Ⅲa潮湿的古气候特征吻合;第 26 层泥岩(4~4.5 m)的硅藻主要为脆杆藻(图 5(d)),该藻属于淡水近岸富营养型,反映水体深度变浅,处在Ⅲb冷干的古气候阶段向Ⅲc温暖潮湿气候的过渡阶段。从古生物的角度证实了上述结论的可靠性。

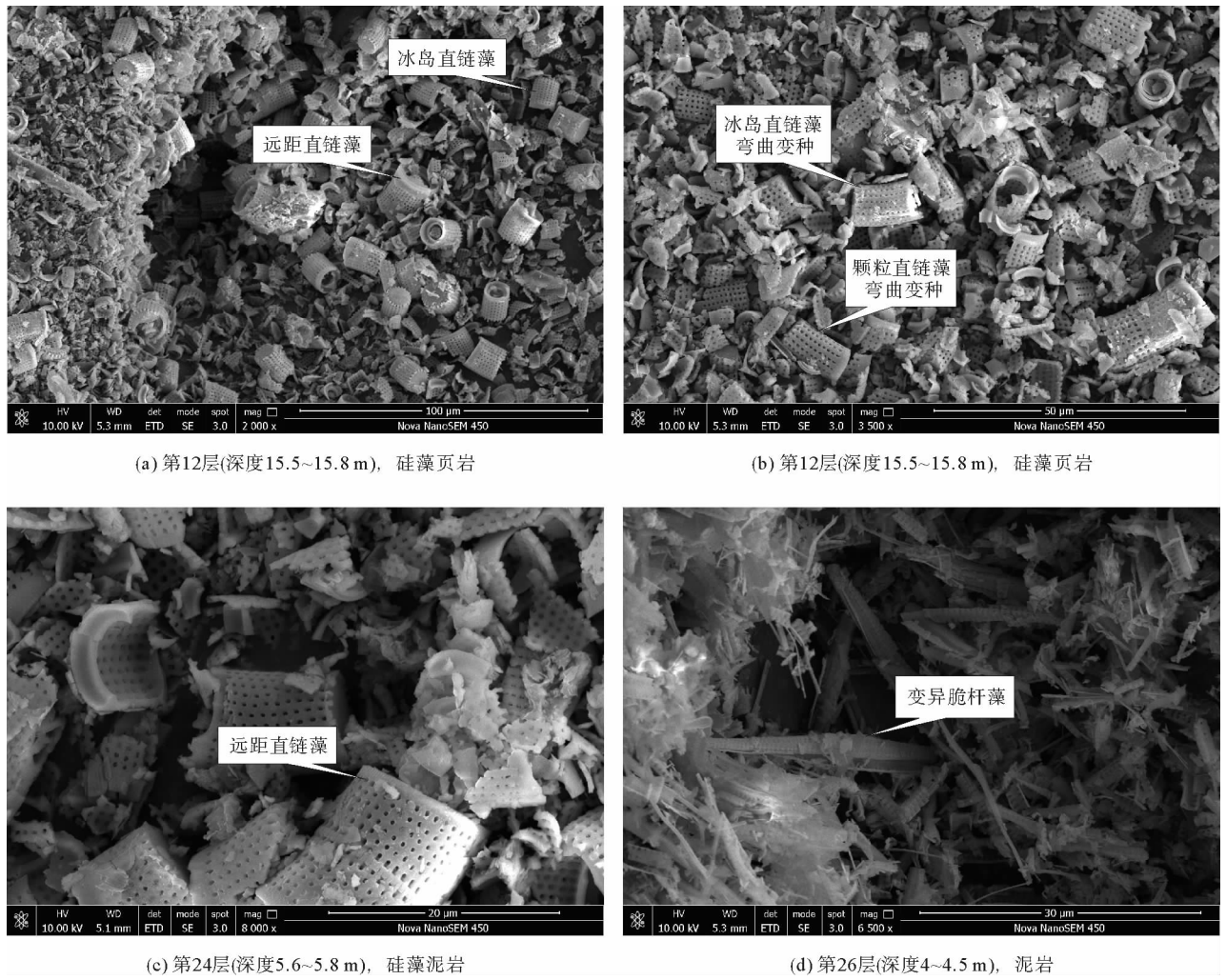


图 5 山旺组硅藻特征

Fig. 5 Diatom characteristics of Shanwang formation

5 结论

1) 山旺盆地山旺组硅藻页岩段时限为 18.524~18.056 MaB.P.。运用 Laskar 等<sup>[7]</sup>的北纬 65°盛夏太阳辐射曲线对实测磁化率曲线进行调谐获得的时间标尺分辨率达 10 kyr。

2) 山旺组硅藻页岩段古气候由老至新分为三个演化阶段,在整体温暖潮湿气候的背景下,也有小尺度冷暖干湿变化,共识别出十二个气候波动期,分辨率达千年级别。阶段Ⅰ(18.524~18.407 MaB.P.)为冷干冷湿交替频繁的气候阶段;阶段Ⅱ(18.407~18.205 MaB.P.)为炎热湿润偶尔短暂冷干的气候阶段;阶段Ⅲ(18.205~18.056 MaB.P.)为相对温暖潮湿的气候阶段,偶尔出现短暂冷干的气候阶段。气候波动出现频率

沿剖面从下往上减少,反映了山旺盆地硅藻页岩段形成初期(冷期)气候波动频繁,中后期(暖期)趋于稳定。

3) 阶段 I、II 和 III 持续的时间分别为 0.117、0.202 和 0.149 Ma,可能主要受地球轨道短偏心率周期影响。此外亚段 I a、I b、I c、I d、I e 和 I f 持续的时间分别为 9、15、18、51、5 和 19 kyr,其时限大多属于岁差或半岁差周期范围,也是轨道力驱动机制的气候响应。说明山旺盆地硅藻页岩段初期(冷期)气候波动频繁,受岁差周期驱动明显,中后期(暖期)气候变化趋于稳定。

综上所述,山旺盆地山旺组硅藻页岩段连续记录了中新世早期丰富的古气候变化信息,为该时段东亚乃至全球古气候变化研究提供了参考实例。

#### 参考文献:

- [1] SOREGHAN G, SNYDER W. Geosystems: Probing Earth's Deep-Time climate and linked systems[M]. Oklahoma: University of Oklahoma Printing Service, 2005.
- [2] HOLDEN C. Fossil trove preserved[J]. Science, 2001, 291: 1481.
- [3] 赵秀丽, 王明镇, 宋香锁. 临朐中新世山旺组孢粉植物群和古气候研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2010, 29(3): 1-8.  
ZHAO Xiuli, WANG Mingzhen, SONG Xiangsuo. Palynoflora and paleoclimate of Miocene Shanwang formation in Linqu[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2010, 29(3): 1-8.
- [4] SUN Q G, MARGARET C, LI C S, et al. Quantitative reconstruction of palaeoclimate from the Middle Miocene Shanwang flora, eastern China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2002, 180(4): 315-329.
- [5] 阎德发, 邱铸鼎, 孟振亚. 山东山旺中新世地层及哺乳动物化石[J]. 古脊椎动物与古人类, 1983, 21(3): 210-222.  
YAN Defa, QIU Zhuding, MENG Zhenya. Miocene stratigraphy and mammals of Shanwang, Shandong[J]. Vertebrata Palasiatica, 1983, 21(3): 210-222.
- [6] 赵秀丽, 张美佳, 章磊, 等. 山东山旺中新世硅藻页岩中植物化石研究新材料[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(4): 1-11.  
ZHAO Xiuli, ZHANG Meijia, ZHANG Lei, et al. New plant fossil materials in diatomaceous shale of Miocene Shanwang formation in Shandong[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 37(4): 1-11.
- [7] LASKAR J, BOUE G. Explicit expansion of the three-body disturbing function for arbitrary eccentricities and inclinations[J]. Astronomy & Astrophysics, 2010, 522(5): 1033-1048.
- [8] 储国强, 刘嘉麒. 中国玛珥湖及其研究意义[J]. 岩石学报, 2018, 34(1): 4-12.  
CHU Guoqiang, LIU Jiaqi. Maar lakes in China and their significance in paleoclimatic research [J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(1): 4-12.
- [9] 张增奇, 刘明渭. 山东省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 274-278.
- [10] YU J F, ZHAO X G, PANG X L, et al. Redefining the age of the Cenozoic Shanwang formation in Shanwang basin[J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 2017, 91(4): 1491-1492.
- [11] HE H Y, DENG C L, PAN Y X. New  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating results from the Shanwang basin, eastern China: Constraints on the age of the Shanwang formation and associated biota[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2011, 187: 66-75.
- [12] 田军, 汪品先, 成鑫荣, 等. 南海 ODP1148 站中新世(12 Ma~18.3 Ma)天文调谐的年代标尺[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2005, 30(5): 513-518.  
TIAN Jun, WANG Pinxian, CHENG Xinrong, et al. Astronomically tuned time scale 12 Ma to 18.3 Ma, ODP site 1148, Northern South China Sea[J]. Earth Science, 2005, 30(5): 513-518.
- [13] 罗攀, 郑卓, 杨小强. 海南岛双池玛珥湖全新世磁化率及其环境意义[J]. 热带地理, 2006, 26(3): 211-217.  
LUO Pan, ZHENG Zhuo, YANG Xiaoqiang. Holocene magnetic susceptibility from Shuangchi Maar lake, Hainan island and its environmental significance[J]. Tropical Geography, 2006, 26(3): 211-217.
- [14] 曾艳, 陈敬安, 朱正杰, 等. 湖泊沉积物 Rb/Sr 比值在古气候/古环境研究中的应用与展望[J]. 地球科学进展, 2011, 26(8): 805-810.  
ZENG Yan, CHEN Jingan, ZHU Zhengjie, et al. Advance and prospective of Rb/Sr ratios in lake sediments as an index of paleoclimate/paleoenvironment[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(8): 805-810.
- [15] 梁明媚. 山东山旺中新世孢粉植物群及古气候和古生态研究[D]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2001: 42-47.

- LA-ICP-MS[J].Chinese Science Bulletin,2010,55(15):1535-1546.
- [18]韩作振,闫俊磊,刘辉,等.吉林永吉地区南楼山组火山岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征[J].山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(1):10-19.
- HAN Zuozhen,YAN Junlei,LIU Hui,et al.Zircon U-Pb chronology and geochemical characteristics of volcanic rocks from the Nanloushan formation in Yongji area, Jilin province[J].Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science) 2018,37(1):10-19.
- [19]冯乔,徐子苏,张耀,等.青岛胶南隆起带小珠山早白垩世花岗岩锆石 U-Pb 年代学及胶东半岛中生代花岗岩成因初探[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(2):1-13.
- FENG Qiao,XU Zisu,ZHANG Yao,et al.Zircon U-Pb geochronology of the Early Cretaceous Xiaozhushan granite in Qingdao Jiaonan uplift and tectonic evolution of Mesozoic granite in Jiaodong Peninsula[J].Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science) 2019,38(2):1-13.
- [20]吴元保,郑永飞.锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J].科学通报,2004,49(16):1589-1604.
- WU Yuanbao,ZHENG Yongfei.Zircon genetic mineralogy and its constraints on U-Pb age interpretation[J].Chinese Science Bulletin,2004,49(16):1589-1604.
- [21]BELOUSOVA E,GRIFFIN W,O'REILLY S Y,et al.Igneous zircon:Trace element composition as an indicator of source rock type[J].Contributions to Mineralogy and Petrology,2002,143(5):602-622.
- [22]ROWLEY D B,XUE F,TUCKER R D,et al.Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan:U/Pb zircon geochronology[J].Earth and Planet Science Letters,1997,151(3):191-203.
- [23]赵世峰.大兴安岭东北部红花岗基地区古生代花岗岩年代学、元素、Hf 同位素地球化学特征[D].长春:吉林大学,2016.
- [24]白志达,徐德兵.牙克石幅 M51C003001、苏格河幅 M51C004001、阿尔山幅 L50C001004 1:25 万区域地质调查报告[R].北京:中国地质大学(北京),2015.
- [25]PEARCE J A,HARRIS N B W,TINDLE A G,et al.Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J].Journal of Petrology,1984,25:956-983.
- [26]高秉璋,洪大卫,郑基俭,等.花岗岩类区 1:5 万区域地质填图方法指南[M].武汉:中国地质大学出版社,1991:20-37.
- [27]邓晋福,罗照华,苏尚国,等.岩石成因、构造环境与成矿作用[M].北京:地质出版社,2004:21-32.

(责任编辑:高丽华)

## (上接第 8 页)

- [16]杨士雄,郑卓,宗永强,等.田洋玛珥湖中更新世以来磁化率特征及其环境意义[J].中山大学学报(自然科学版),2012,51(3):121-127.
- YANG Shixiong,ZHENG Zhuo,ZONG Yongqiang,et al.Characteristics and environmental significance of magnetic susceptibility of the Tianyang Maar lake since Middle Pleistocene[J].Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2012,51(3):121-127.
- [17]齐向前,陈鹏,余继峰,等.山东山旺盆地地质研究现状及展望[J].科技创新导报,2012(26):31.
- [18]梁明媚,王宇飞,李承森.山旺中新世植被演替及古气候定量研究[J].古地学报,2001,3(3):11-20.
- LIANG Mingmei,WANG Yufei,LI Chengsen.Palaeovegetation succession and quantitative palaeoclimate reconstruction of the Miocene Shanwang assemblage[J].Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),2001,3(3):11-20.

(责任编辑:高丽华)