

文章编号: 1000-0550(2004)02-0267-09

山东山旺中新世硅藻土的纹层类型及成因¹

覃文圣¹ 刘建波¹ 韩宝福¹ 王宪曾¹ 李福昌²

1(北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室 北京 100871)

2(山东临朐山旺化石博物馆 山东临朐 262600)

摘要 山东临朐山旺地区中新世山旺组硅藻土极为发育。通过对该地区硅藻土纹层的研究,确定其分类和成因,为进一步确立年纹层的存在、利用其进行高分辨率测年、探讨高频古气候旋回奠定基础。山旺组硅藻土的单层纹层厚度一般为 100 μm 左右。依据纹层的物质成分,单层纹层可分为硅藻纹层、有机质纹层和粘土纹层三种类型。各类单层纹层组合成为明暗相间的层偶,层偶厚度一般为 100~400 μm,常常表现为浅色的硅藻纹层逐渐向深色的粘土纹层或有机质纹层渐变过渡。纹层偶可分为:薄层硅藻纹层—有机质层偶,厚层藻纹层—有机质层偶,薄层粘土纹层—有机质层偶,厚层粘土纹层—有机质层偶和硅藻纹层—粘土纹层层偶。山旺组硅藻土中不同类型的单层纹层以及层偶的形成主要受控于当时湖盆内粘土物质的沉积速率、硅藻的繁盛程度和有机物质的沉积和保存条件。

关键词 硅藻土 纹层 层偶 山旺组 中新世

第一作者简介 覃文圣 男 1977 年出生 硕士研究生 沉积学

中图分类号 P512.2 文献标识码 A

1 引言

湖泊沉积学研究是全球变化研究的重要方面^[1,2]。湖泊可以成为研究全球变化的独立“实验室”,它的发育和演化对气候反映灵敏,是古气候的“监测器”。但是,古湖泊发育演化过程中的水体物理化学条件、外动力状况以及水体影响和水体自身的变化等都无法得到直接的数据,迄今也没有一种很成熟的方法可以定量计算,只能根据保存下来的沉积物去追溯和推测它的发生发展过程^[3,4]。

硅藻土是一种生物成因的硅质沉积物,主要由古代硅藻及一部分放射虫类的硅质壳体组成^[5]。山东临朐县山旺盆地中的山旺组是中国北方中新统的标准剖面,其化石产出丰富,保存完整,种类繁多,被誉为全世界的化石宝库。山旺组中硅藻土纹层发育极为良好^[6]。选择山旺组的硅藻土作为研究对象是由于:(1)硅藻土沉积的纹层本身就是研究高分辨率气候旋回的良好基本材料;(2)国内硅藻土沉积学研究尚处于起步阶段,需要进一步工作;(3)山旺盆地中新世地层古生物学方面研究的深入^[7~14],为硅藻土沉积学方面的研究提供了良好的基础;(4)山旺盆地的中新世地层连续,出露好,硅藻土的发育非常理想。因此对该地区硅藻土进行沉积学研究条件非常优越。

本文对山东山旺中新世硅藻土沉积学的研究是为确立在该沉积物中存在年纹层,并利用其进行高分辨

率测年、探讨古环境、古气候、古生态不可或缺的基础性工作。如果通过进一步的纹层古气候重建研究可以为该地区过去的环境变化描绘出一条轨迹,再结合其它区域的古环境演变可以得出全球大范围的古环境变化,进一步对比参照现代环境和生态甚至可以预测将来环境和气候的变化大趋势。

2 研究区域地质概况

山旺盆地位于山东省临朐县城东 22 km 处(118°21' E, 36°54' N)(图 1)。在大地构造的位置上而言,该盆地位于欧亚板块东缘郯庐断裂带上。在区域上,太古界泰山群片岩,片麻岩等变质岩系构成基底;盖层由寒武—奥陶系海相页岩、灰岩和白云质灰岩等组成。上古生代地层只在西北部有所出露。白垩纪火山岩、火山碎屑岩和砂岩、砾岩等陆相沉积沿郯庐断裂带分布,属于裂谷型盆地沉积。老第三纪河流—湖泊沉积也有所分布。第三纪碱性玄武岩浆的多期喷发活动及喷发活动间歇期的湖泊相、冲洪积相沉积物,沿郯庐断裂带及其两侧断续出现,山旺盆地是其中之一^[15]。区域内新构造运动十分普遍。在山旺盆地的外围,以大的压性断裂为主,变质岩系和寒武—奥陶纪地层逆冲在白垩纪地层之上^[16,17]。

山旺盆地发育有以硅藻土和含硅藻泥岩为主的湖泊沉积,为中国北方上第三系中新统的典型剖面。该盆地是一个北西—南东向延伸的小盆地,长轴方向不

¹ 由国家自然科学基金资助项目(批准号:49902003)和科技部社会公益性项目中国重要地质遗产保护研究“山东山旺中新世生物群化石产地保护研究”(批准号:2001DIA20025-3)资助
收稿日期:2003-03-31

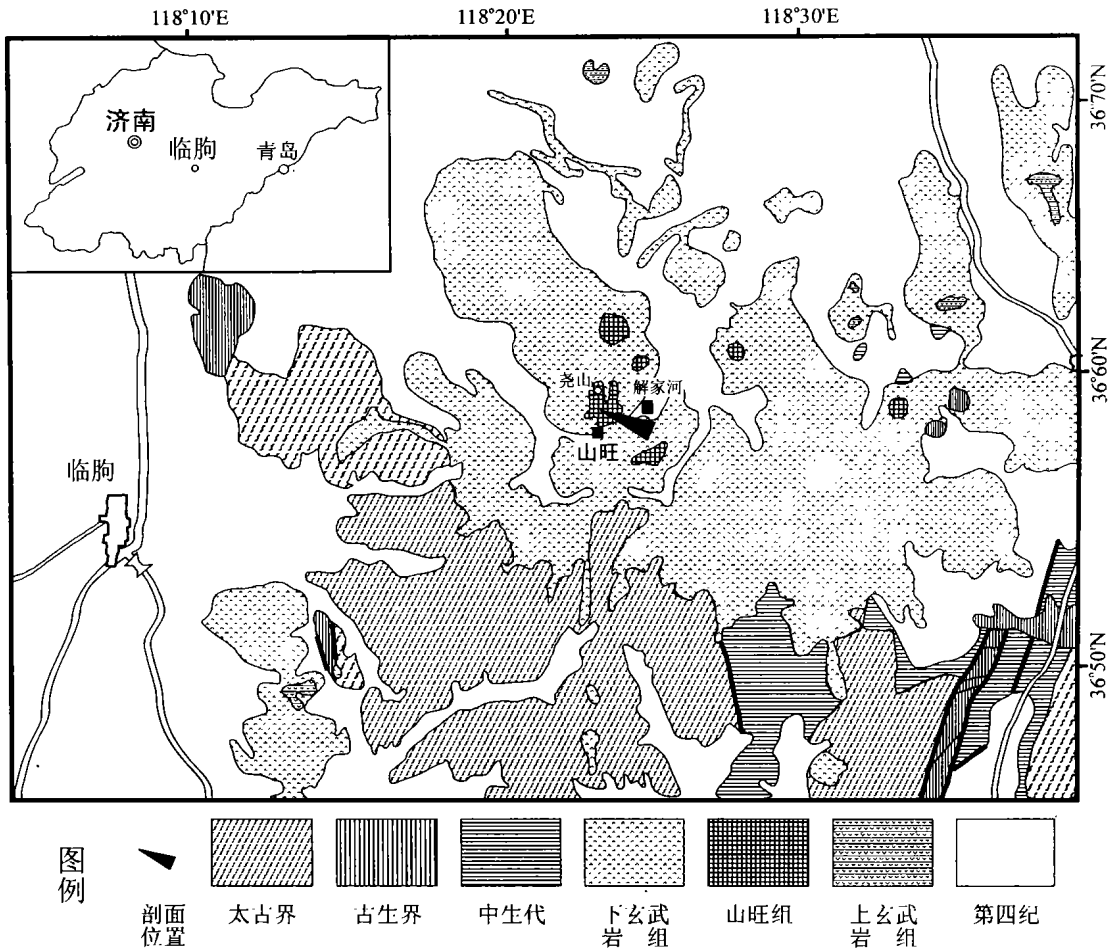


图 1 研究区域交通位置图

Fig. 1 Location of the study area

过 600 m, 北东-南西方向不过 500 m, 加上周围湖岸相分布面积也不足 1 km^2 。盆地面积小而孤立分布, 对其湖盆的原始成因众说纷纭, 至今尚未有定论^[16]。

3 研究方法

研究中使用的样品采自山旺盆地硅藻土采矿场, 其产出层位是位于山旺组的下部。野外连续采集 3.3 m 的硅藻土样品, 样品在采集后立即用塑料标本袋密封以防硅藻土脱水变形。在室内将硅藻土样品固定、用环氧树脂胶结之后, 再缓慢烘干 2~3 天。之后将其连续切割后抛光制成光面, 用以进行沉积构造和纹层特征分析。同时制作相应的岩石薄片, 在偏光显微镜和扫描电子显微镜下研究硅藻土纹层的沉积结构、特征矿物组成等, 并进一步利用 X-衍射方法分析不同类型的纹层的矿物组成, 用电子探针方法分析常量和微量元素在纹层中的分布特点。

4 硅藻土纹层和层偶类型

山旺组硅藻土的宏观特征为以水平层理为主(图

版 iv-A), 局部有同沉积变形(揉皱)或由于自生矿物结核造成的纹层变形现象, 通常绝大多数水平层理可以在野外露头横向追索。

对硅藻土纹层分类的研究最早集中在于有无纹层的探讨上^[18]。近十年来对硅藻土纹层的研究已经深入到了数百微米尺度上的纹层本身, 并对纹层类型进行多种因素的具体分类^[19], 目的是为了提提高古环境的分析精确度。因而目前对硅藻土纹层的分类是着眼于在更高层次上进行的以体现古生物为媒介的沉积过程和生物的地球化学作用的轮回^[20-23]。而对纹层的分类一般标准: 单层纹层和纹层层偶。

在显微镜下单层纹层厚度一般多为 $100 \mu\text{m}$ 左右。依据纹层的主要物质成分的不同, 山旺组硅藻土中的单层纹层可以划分为硅藻纹层、有机纹层和粘土纹层三种类型: 硅藻纹层的颜色为白色以及浅色, 厚度为 $20\sim 200 \mu\text{m}$, 而且多小于 $100 \mu\text{m}$, 纹层中的硅藻壳体化石富集($> 60\%$), 其他的物质一般为少量粘土和生物腐殖质(图版 iv-B)。粘土纹层多为黄褐色~土黄色, 厚度为 $30\sim 300 \mu\text{m}$, 但是一般都在 $100 \mu\text{m}$ 左右, 主要

由粘土物质 (> 60%) 组成, 含有少量硅藻化石 (< 15%) 和极少量的生物碎屑 (图版 iv-C)。有机纹层多为黑色及暗色, 以生屑物质为主 (> 60%), 片状页理很明显, 纹层厚度是 50~ 150 μm, 多在 50 μm 左右, 含少量粘土物质, 硅藻壳体化石少于 15% (图版 iv-D), 区别于粘土纹层的另一主要特点就是其中有时可以看到有机物质的丝状体。

对山旺组硅藻土中单层纹层进行 X 射线衍射分析, 发现硅藻纹层的矿物组成明显不同于粘土纹层。硅藻纹层 (图 2A) 的主要矿物为无定型氧化硅 (> 65%), 主要是组成硅藻壳体的蛋白石, 长石、石英、方解石、蒙脱石的含量较低 (< 35%)。粘土纹层 (图 2B) 的主要矿物为蒙脱石 (> 85%), 伊利石次之, 次要矿物有石英、针铁矿、斜长石等, 其中含有少量的无定型氧化硅。因此, 粘土纹层主要由陆源碎屑性的细粒粘土矿物组成, 硅藻纹层主要由盆地内生物成因的硅藻壳体组成, 二者的来源和形成环境有很大的不同。

由于颜色存在明显的差异, 硅藻纹层、粘土纹层、有机质纹层常常相互组合成为明暗相间的层偶。层偶由两个不同类型的纹层组成。层偶内的纹层之间一般呈现渐变过渡关系, 比如, 由下部的硅藻纹层逐渐向上部的粘土纹层或有机质纹层渐变过渡, 表现为硅藻含量逐渐降低, 粘土、有机质含量逐渐升高。层偶内下部纹层和上部纹层厚度比例约是 1: 1~ 5: 1 之间, 3: 1 的厚度比例较为常见 (图版 iv-E)。层偶厚度是 50~ 400 μm, 一般的为 150 μm 左右。

根据层偶中的单层纹层类型和相对厚度, 所研究的样品中的层偶可划分: 薄层粘土纹层—有机质纹层层偶、厚层粘土纹层—有机质纹层层偶 (图版 iv-F), 薄层硅藻纹层—有机质纹层层偶和厚层硅藻—有机质纹层层偶 (图版 iv-G), 硅藻纹层—粘土纹层层偶 (图版 iv-H)。山旺组硅藻土的纹层、层偶类型及其特征的具体描述见表 1。

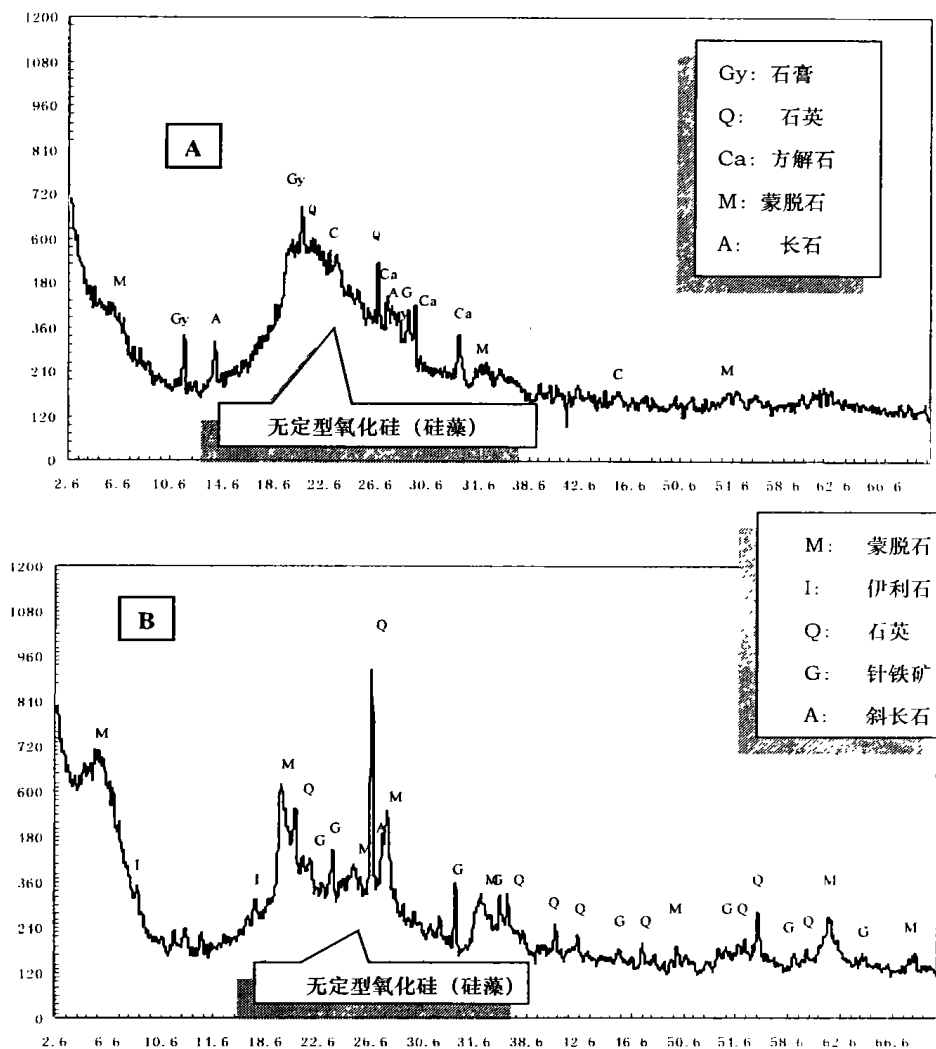


图 2 山旺组硅藻土 X 射线衍射图 A: 硅藻纹层; B: 粘土纹层

Fig. 2 X-ray analysis of diatomites in the Shanwang Formation. A: Diatomaceous laminae; B: Clay laminae

表 1 山旺组硅藻土中纹层和层偶的类型及特征

Table 1 Characteristics of the diatomaceous lamina and laminae couplet in the Shanwang Formation

单层类型	纹层 有机质	单层颜色呈黑色和灰度很高的暗色, 层厚范围是 50 ~150 μm , 有时候出现厚层富集, 纹层厚度多在 50 μm 左右发育, 主要由生屑有机质组成 (>90%), 含少量硅藻以及少量斜长石、石英等碎屑。	
	纹层 硅藻	单层颜色主要为白色和其他浅色, 一般的厚度范围为 20~200 μm , 纹层厚度多是小于 100 μm , 主要由硅藻组成 (>60%), 含少量蒙脱石薄层和少量斜长石、石英以及少量生物碎屑。	
	纹层 粘土	单层颜色多为黄褐色~土黄色, 厚度范围为 30~300 μm , 厚度一般以 100 μm 左右为多, 物质成分以蒙脱石为主 (>60%), 还含有斜长石、石英、绿泥石等矿物以及少量的硅藻壳体 (<10%) 和极少量的生物碎屑。	
层偶类型	粘土纹层+有机质纹层层偶	薄层粘土+有机质层偶	层偶中的薄层粘土纹层颜色相对有机层较浅, 主要以蒙脱石为主 (>80%), 斜长石、石英、绿泥石等碎屑物质常见, 还含有少量的硅藻壳体, 厚度一般都小于 100 μm 。有机质层颜色主要为黑色和深褐色, 主要由生物碎屑有机质组成, 纹层当中还含少量斜长石、石英等碎屑以及少量硅藻壳体, 平均厚度在 100 μm 左右; 层偶厚度范围一般在 60~200 μm 左右, 明暗层之间的反差程度一般, 整体颜色较深, 厚度比大概为 3:1。
		厚层粘土+有机质层偶	层偶中的厚层粘土颜色浅黄, 主要以蒙脱石为主 (>80%), 斜长石、石英、绿泥石等碎屑物质较常见, 还含有少量的硅藻壳体, 单层纹层的厚度都大于 100 μm 。有机层颜色主要是褐色和黑色, 主要由生物碎屑有机质组成, 含少量硅藻壳体 and 少量斜长石、石英等碎屑, 平均厚度在 100 μm 左右; 层偶厚度范围一般为 100~400 μm , 明暗反差较为明显, 厚度比大概为 5:1。
	硅藻纹层+有机质纹层层偶	薄层硅藻+有机质层偶	薄层硅藻层的颜色由亮白色到土白色, 主要由硅藻壳体组成 (>60%), 含少量蒙脱石以及斜长石、石英等碎屑, 纹层厚度小于 100 μm 。有机层主要由含碳化植物碎片和腐殖质等有机质组成, 含少量硅藻以及少量玄武岩、斜长石、石英等碎屑, 单层厚度在 100 μm 左右。层偶一般的厚度范围为 50 ~250 μm , 层偶间的明暗反差极为明显, 厚度比大概为 1:1。
		厚层硅藻+有机质层偶	厚层硅藻层的颜色由亮白色到土白色, 主要由硅藻壳体组成 (>60%), 含少量蒙脱石和少量斜长石、石英等碎屑, 纹层厚度多是大于 100 μm , 在岩石中发育很整齐。有机层主要由生物碎屑有机质组成, 含少量硅藻以及少量玄武岩、斜长石、石英等碎屑, 单层厚度在 100 μm 左右。层偶一般的厚度范围为 100~300 μm , 层偶明暗反差极为明显, 厚度比大概为 3:1。
	硅藻纹层+粘土纹层层偶	硅藻纹层的颜色由亮白色到土白色, 主要由硅藻壳体组成 (>60%), 含少量蒙脱石和少量斜长石、石英等碎屑, 纹层厚度多是在 100 μm 左右, 在岩石中发育很整齐。粘土纹层中主要以蒙脱石为主 (>85%), 斜长石、石英、赤铁矿、绿泥石等碎屑物质较多, 纹层当中有少量的硅藻壳体, 单层厚度在 100 μm 左右, 颜色总体发灰; 层偶厚度多是 80~400 μm , 明暗反差一般, 整体显浅色, 厚度比大概为 2:1。	

5 纹层成因

水平纹层是山旺硅藻土中主要的沉积构造类型。以连续纹层为主, 厚度一般小于 100 μm 。它指示的是在弱水力条件下, 悬浮的细粒沉积物不断沉降而形成的。

陆地湖泊纹层主要是由陆源输入、化学条件、生物

活动的时空变异等导致沉积物组分的周期性变化而形成的^[24,25]。山旺组中的硅藻纹层主要由硅藻组成, 是硅藻季节繁盛的结果。硅藻的生长主要受温度和水体中可溶性硅含量所控制。硅藻对温度响应通常比对其他环境要素更敏感, 比较适应温暖的水体环境^[23]。在中新世, 山东山旺地区年平均气温较低^[26~28], 适宜于硅藻生长繁盛的时期较短, 因此硅藻的繁盛受季节控

制显著,因而具有明显的季节意义。另外,硅藻繁盛不仅与气候有关,而且还与各种营养物质有关。其中,硅是硅藻生长必需的元素,对硅藻的繁盛起到主要的作用。山旺盆地的硅主要来源是周围充足的牛山组的玄武岩,因此该地区维系硅藻生长的物质来源不存在问题。硅藻纹层中的硅藻含量极为丰富,应该是在硅藻极其繁盛的时期形成的,而其厚度变化可能与温度和降水量^[32,33]的变化有关:温暖的水温有利于硅藻的繁殖,使得单位时间内的硅藻数量大为增加,从而造成硅藻纹层厚度的增加;降水量的增加则可能增大硅藻纹层的陆源粘土的注入量,由于营养物质的富集,硅藻繁盛,从而也会导致硅藻纹层厚度增加。

与硅藻纹层相比,粘土纹层中硅藻含量明显的大为降低,说明当该类纹层发育时虽然存在硅藻但并不繁盛。大量的粘土矿物的形成可能来自于玄武岩玻璃的蚀变作用^[16]。粘土纹层中的蒙脱石可能绝大部分来源于湖盆附近火山喷发的玄武岩,它们中大部分是在地表风化后随径流流入湖盆,少量则是进入湖盆后再转变为蒙脱石。斜长石、石英也是风化的产物,也只能通过陆地搬运至湖盆内。因此,硅藻土中的粘土纹层是在硅藻并不繁盛的时期,陆源物质的稳定或者大量注入所造成的。

有机质纹层沉积主要是来自湖盆内部的其他藻类生物和少量陆地上冲刷进入湖盆的植物。其中可以观察到低等藻类的丝状体(> 90%),偶尔也可以看到少量的植物叶片碎屑(< 3%),说明其主要是由湖盆内部的有机物质沉积形成的,应该形成于湖盆内部硅藻不繁盛而湖盆内部其它藻类生物繁盛的时期。值得注意的是,山旺组中存在大量的植物茎叶等化石,它们对有机纹层的形成也起到一定的作用。根据目前的材料可以认为有机纹层的形成是在硅藻不繁盛的时期,外源注入较少的时期由湖盆内的其他低等生物体有机沉积的结果。

总之,山旺组各种不同类型纹层的形成关键在于季节温度不同和降水的多少以及湖盆里的其他生物体有机沉积等综合情况所决定的。

山旺组中不同种类的纹层层偶的形成主要由于硅藻、粘土和有机质含量比的变化以及所沉积的单类纹层厚度的不同所造成的。薄层硅藻纹层—有机质纹层层偶(图版④A)来源于该地区当时较为正常的硅藻沉降和正常的陆源粘土物质输入;厚层硅藻纹层—有机质纹层层偶(图版④B)的形成主要来源于硅藻繁盛时硅藻的大量生长以及沉积后的保存。粘土纹层—硅藻纹层层偶(图版④C)自下而上白色硅藻层的丰度逐渐降低,这代表着硅藻生长逐渐受到抑制或陆源细粒粘

土沉积速率增大。薄层粘土纹层—有机质纹层层偶(图版④D)的发育说明硅藻可能处于休眠期,从而使白色硅藻层的沉积停止,这个时候陆源粘土正常的注入以及湖盆内部其他低等生物大量短暂生长死亡沉积所形成的;有机质纹层—厚层粘土纹层层偶(图版④E)可能是在硅藻生长受抑制的时期其他的湖盆低等生物大量生长,而且此时的降雨量有所增加,从而造成从湖盆边缘冲刷注入大量的陆源碎屑物的沉积事件。

山旺组各种纹层的形成后,其保存条件至关重要,只有在条件适合的状态下,才能使沉积下来所形成的纹层不遭受破坏^[29],而且只有水深比较大的湖泊才能使沉积物免受风场干扰,使纹层形成以后处于一个低能静水的保存环境^[24]。在山旺组硅藻纹层的样品当中可以看到代表还原环境的草莓状黄铁矿(图版④E),但是没有发现生物搅动的痕迹,可能主要是湖盆底部的还原环境导致喜氧底栖生物因为缺氧难于生存而不能破坏纹层的发育^[16,29],同时还原环境也有利于纹层本身的形成和保存。但是在厚层的粘土岩当中存在对生态和环境适应能力较强的软躯体蠕虫动物寡毛类生物扰动的痕迹^[13],进一步说明了湖泊底部为平静缺氧的静水层,温度比较低,它与湖面温水层之间可能存在一个温跃层,使得湖水有温度分层现象^[30,31],因而山旺古湖泊是表层生物发育繁盛而底部是生物贫乏沉积物保存极好的环境。正是由于山旺盆地在中新世时期的湖泊正好具备了纹层形成的条件,因而发育了良好的硅藻土纹层。

6 结论

通过研究山旺盆地中新世硅藻土的纹层类型和成因,可以获得以下初步认识:

(1) 纹层按组份分为三种类型:有机纹层、硅藻纹层、粘土纹层。它们的区别主要在于硅藻、粘土、有机质含量的明显不同。按层偶类型可以分为:薄层粘土—有机质层偶、厚层粘土—有机质层偶,薄层硅藻—有机质层偶、厚层硅藻—有机质层偶,硅藻—粘土层偶。

(2) X射线衍射分析,揭示硅藻土中粘土纹层的主要矿物为蒙脱石(> 85%),次要矿物有石英、斜长石等,其中还含有少量的无定型氧化硅。硅藻纹层的主要矿物为无定型氧化硅(> 65%),石英、方解石、蒙脱石和斜长石的含量较低。因此粘土纹层主要由陆源碎屑性的细粒粘土矿物组成,硅藻纹层主要由盆地内生物成因的硅藻壳体组成,二者的形成环境有很大的不同。有机纹层与硅藻纹层和粘土纹层的区别除了在颜色上表现为很深的暗色以外,有机纹层普遍可以见到低等藻类的丝状体结构和大量的有机物质残片。

(3) 山旺组各种不同类型纹层的形成关键在于硅藻的繁盛程度不同, 硅藻纹层主要受到温度的影响, 粘土纹层主要受到降水的影响。其中硅藻—粘土层偶来源于该地区中新世正常的硅藻沉降和陆源粘土注入。硅藻—有机质层偶的形成主要来源于硅藻繁盛时硅藻的大量生长保存以及湖盆内外其他低等藻类和有机生物的繁盛与保存。粘土层偶—有机质的发育说明硅藻的发育可能基本停止, 而使白色的硅藻土纹层的沉积停止, 此时外源注入丰富以及其他低等藻类繁盛。

致谢 山旺自然保护区管理所李俊德先生在野外工作期间给予大力协助; 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室样品制备室的倪德宝和贾秋月两位老师帮助制备岩石抛光面和岩石薄片, X 射线衍射室王佩瑛老师进行了 X 射线的衍射分析并提供了 X 衍射图谱和矿物组成的解释, 扫描电镜室的舒桂明老师指导完成扫描观察和电子探针分析; 日本大阪市立大学理学部地球科学系奥平敬元博士提供 SEM 和 EDAX 分析。在此对他们表示深深的谢意!

参考文献 (References)

- Duplessy J C, Overpeck J. The PAGES/CLIVAR Intersection: Coordinated Research Objectives of the International Geosphere-Biosphere (IGBP) and World Climate Research (WCRP) Programs. Venice: Report of a Joint IGBP-WCRP Workshop, 1994. 1~ 40
- Anderson R Y, Dean W E. Lacustrine varve formation through time. *Paleogeography Paleoclimatology Paleoecology*, 1988, 62: 215~ 235
- 霍坎松, 等. 湖泊沉积学原理. 北京: 科学出版社, 1992 [Hakanson L, et al. Principles of Lake Sedimentology. Beijing: Science Press, 1992]
- 莱尔曼. 湖泊化学、地质学的物理学. 北京: 地质出版社, 1978 [Lerman, Lakes Chemistry Geology Physics. Beijing: Geological Publishing House, 1978]
- 刘春华, 魏仪芳, 王生. 硅藻岩的岩石学特征和形成环境. 长春地质学院学报, 1995, 25(2): 138~ 143 [Liu Chunhua, Wei Yifang, Wang Sheng. Petrology and the producing environment of diatomite. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 1995, 25(2): 138~ 143]
- 李承森, 王宇飞, 孙启高, 等. 山东省临朐县山旺组硅藻土层的划分. 植物学报, 2000, 17(10PC-VI 古植物学专辑): 247~ 251 [Li Chengsen, Wang Yufei, Sun Qigao, et al. The stratigraphical sequence of the diatomaceous earth from the Shanwang Formation, Linqu County, Shandong Province [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2000, 17(Special volume for palaeobotany): 247~ 251]
- 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. 古脊椎动物与古人类, 1983, 12(3): 211~ 221 [Yan Defa, Qiu Zhuding, Meng Zhenya. Miocene stratigraphy and mammals from Shanwang, Shandong. *Vertebrata Palasiatica*, 1983, 12(3): 211~ 221]
- 李凤麟. 山东临朐山旺组的再认识. 地层学杂志, 1991, 15(2): 123~ 129 [Li Fenglin, Reconsideration of the Shandong Formation, Linqu, Shandong. *Journal of Stratigraphy*, 1991, 15(2): 123~ 129]
- 梁明媚, 阎际兴, 宋书银, 等. 山东山旺中新世植物群研究进展. 植物学通报, 1998, 15(增刊): 32~ 40 [Liang Mingmei, Yan Jixing, Song Shuyin, et al. Advance of research on Miocene flora from Shanwang in Shandong Province. *Chinese Bulletin of Botany*, 15(Supplement): 32~ 40]
- 张俊峰. 山旺昆虫化石. 济南: 山东科学技术出版社, 1989. 1~ 459, pls. 1~ 92 [Zhang Junfeng. Fossil Insects from Shanwang, Shandong, China. Jinan: Shandong Science and Technology Publishing House, 1989. 1~ 459, pls. 1~ 92]
- 孙博主编. 山旺植物化石. 济南: 山东科学技术出版社, 1999. 1~ 167, pls. 62 [Sun Bo (Editor-in-Chief). Fossil Plants of Shanwang. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1999. 1~ 167, pls. 62]
- 侯连海, 周忠和, 张福成, 等. 山东山旺发现中新世大型猛禽化石. 古脊椎动物学报, 2000, 38(2): 104~ 110 [Hou Lianhai, Zhou Zhonghe, Zhang Fucheng, et al. A new vulture from the Miocene of Shandong, eastern China. *Vertebrata Palasiatica*, 2000, 38(2): 104~ 110]
- 杨式溥. 山东山旺中新世硅藻页岩中的遗迹化石. 地质论评, 1996, 42(2): 187~ 190 [Yang Shipu. Trace fossils from the Miocene diatomites of Shanwang, Shandong, China. *Geological Review*, 1996, 42(2): 187~ 190]
- 王宪曾. 山东临朐山旺组真菌化石的发现及其意义. 见: 岩石圈地质科学论文集. 北京: 北京大学出版社, 1989. 19~ 26 [Wang Xi-zeng. Discovery of fungus fossils from Shanwang Formation, Linqu, Shandong and its implication. In: *Geological Sciences of Lithosphere*. Beijing: Beijing University Press, 1989. 19~ 26]
- 山东区域地层表编写组. 华东地区区域地质表山东分册 5. 潍坊地层小区. 北京: 地质出版社, 1987. 34~ 37 [Compiling Group of Shandong Stratigraphical Sequence. A stratigraphical sequence of Weifang region. In: *Stratigraphical Tables of East China (Volume 5 for Shandong)*. Beijing: Geological Publishing House, 1987. 34~ 37]
- 张明书, 单莲芳. 旺盆地沉积地质学. 北京: 地质出版社, 1994. 1~ 83 [Zhang Mingshu, Shan Lianfang. Sedimentary Geology of Shanwang Basin. Beijing: Geological Publishing House, 1994. 1~ 83]
- 金隆裕. 郑庐断裂带中段新生代火山岩的 K-Ar 年龄值和分期. 地质论评, 1985, 31(4): 309~ 315 [Jin Longyu. K-Ar ages of Cenozoic volcanic rocks in the middle segment of the Tancheng-Lujiang fault belt and stages of related volcanic activity. *Geological Review*, 1985, 31(4): 309~ 315]
- Garrison R E, Douglas R G, Pisocotto K A, Isaacs C M, et al. The Monterey Formation and related siliceous rocks of California. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section, Special Publication, 1981, 15: 327
- Brodie I, Kemp A E S. Variation in biogenic and clay fluxes and formation of laminae in late Quaternary sediments from the Peruvian coastal upwelling zone. *Marine Geology*, 1994, 116: 385~ 398
- Grimm K A, Lange C B, Gill A S. Biological forcing of hemipelagic sedimentary laminae: Evidence from ODP Site 893, Santa Barbara Basin, California. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66: 613~ 624
- Pike J, Kemp A E S. Early Holocene decadal-scale ocean variability recorded in Gulf of California laminated sediments. *Paleoceanography*, 1997, 12: 227~ 238
- Kemp A E S. Sedimentary fabrics and variation in lamination style in Peru continental upwelling sediments. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 1990, 112(Ocean Drilling Program, College Station, Texas), 43~ 58

- 23 Alices S C, Kurt A G, Lisa D, White diatomaceous Sediments from the Miocene Monterey formation, California: A Lamina- scale investigation of biological, ecological, and sedimentary Processes. *Palaios*, 1998, 13: 439 ~ 458
- 24 李万春, 李世杰, 濮培民. 高分辨率古环境指示器——湖泊纹泥研究综述. *地球科学进展*. 1999, 14(2): 172~ 176[Li Wangchun, Li Shijie, Pu Peimin. Review on the high resolution varved lake sediments as a proxy of paleoenvironment. *Advance in Earth Science*, 1999, 14(2): 172 ~ 176]
- 25 O Sullivan P E. Annually laminated lake sediments and the study of Quaternary environmental changes—a review. *Quaternary Science Review*, 1983, 1: 245~ 313
- 26 石玲. 山东山旺中新世硅藻及其环境的模糊数学的聚类分析. *植物学报*, 1990, 32(11): 888~ 895[Shi Ling. Miocene diatoms from the Shanwang Basin of Shandong Province and analysis by fuzzy mathematics of the paleoenvironment. *Acta Botanica Sinica*, 1990, 32(11): 888~ 895]
- 27 杨洪. 古生物的全息生活型复原及山旺中新世植物群的古气候指示. *大自然探索*, 1988, 7(1): 127~ 133[Yang Hong. Reconstruction of Holographic life form in palaeobotany and paleoclimatic indication of Shanwang Miocene flora. *Exploration of Nature*, 1988, 7(1): 127~ 133]
- 28 王宪曾. 山东临朐中新世山旺湖古环境初探. *北京大学学报(自然科学)*, 1981, 4: 100~ 111[Wang Xianzeng. An introductory survey of the paleoenvironment of Miocene Shanwang Lake in Linqu, Shantung Province. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, Issue, 1981, 4: 100 ~ 111]
- 29 陈富平. 山东山旺中新世鱼化石埋藏学及古湖泊环境. *植物学通报*, 2000, 17(IOPC - VI 古植物学专辑): 264~ 271[Chen Pingfu. Fish taphonomy and its paleoclimatological significance from the Miocene Shanwang Formation, Shandong, eastern China. *Chinese Bulletin of Botany*, 2000, 17(Special Issue): 264~ 271]
- 30 Wetzel R G. *Limnology*. Saunders Philadelphia, 1975. 243
- 31 Lindell T. Hydrographic characteristics. In: Welch, ed. *Ecological effects of waste water*. Cambridge University Press, 1980
- 32 Eppley R W. The growth and culture of diatoms. In: Wemer D, ed. *The Biology of Diatoms*. California: University of California Press, 1978. 24~ 64
- 33 Zolitschka B. High resolution lacustrine sediments and their potential for paleoclimatic reconstruction. In: Jones P D, Bradley R S, Jouzel J, eds. *Climatic Science*. 1996, 166: 1191~ 1194

Types and Origin of Diatomaceous Laminae of the Miocene Shanwang Formation in Linqu, Shandong Province

QIN Wen-sheng¹ LIU Jian-bo¹ HAN Bao-fu¹
WANG Xian-zeng¹ LI Fu-chang²

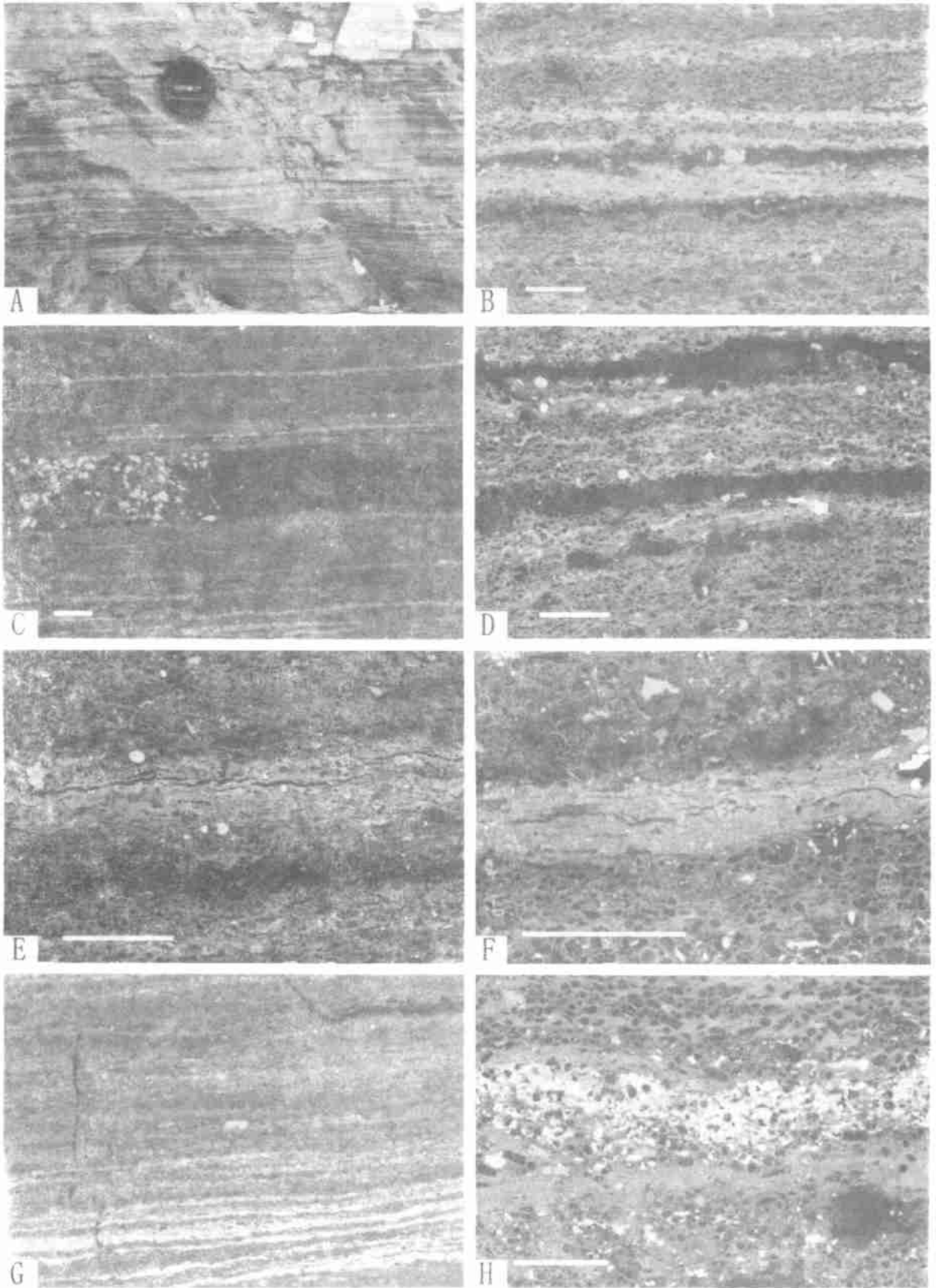
1(Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Department of Geology, Peking University, Beijing 100871)

2(Fossil Museum of Shanwang, Linqu, Shandong 262600)

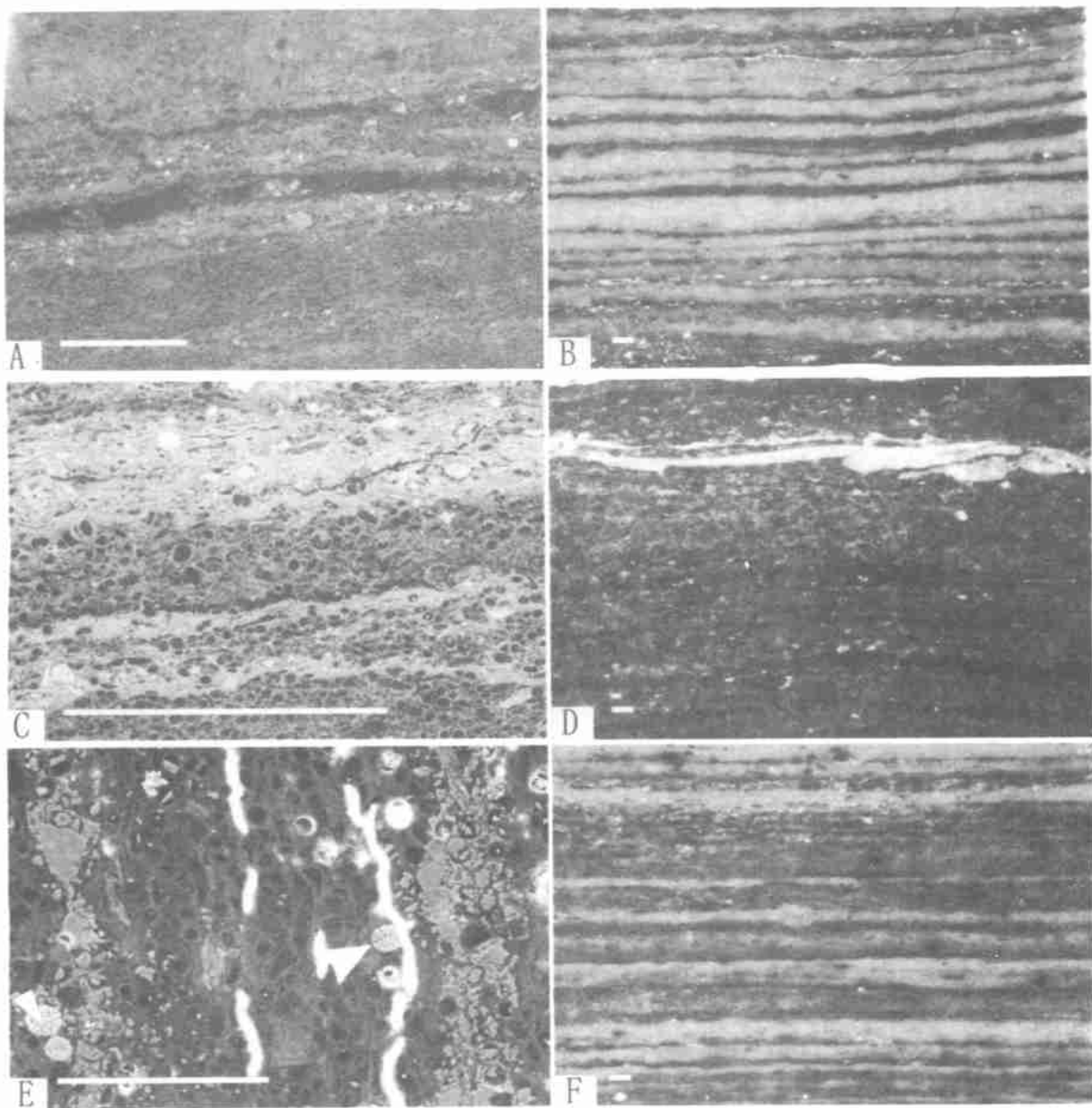
Abstract The Miocene Shanwang Formation in Linqu of Shandong Province consists mainly of lacustrine diatomaceous sediments. Detailed sedimentary study on the laminated diatomites in the Shanwang Formation is necessary for the further work on reconstruction of high-frequency climatic cycle.

Based on the major mineral composition and their ratios, the diatomaceous sediments in the Shanwang Formation are distinguished as three distinct laminae (clay laminae, diatomaceous laminae and organic matter laminae) and three lamina couplet types (organic matter-clay couplet, organic matter-diatomaceous couplet and diatomaceous couplet-clay couplet). The formation of diatomaceous laminae and lamina couples in the Shanwang Formation was controlled by sedimentary rate of terrigenous clays, diatom growth, and deposition and preservation of organic matters in the basin.

Key words diatomite, laminae, lamina couplet, Shanwang formation, miocene



图版 I 说明 A 山旺组硅藻土的野外照片, 具有明显的水平纹层; B 硅藻纹层的扫描电镜照片, 其中浅色的为硅藻纹层; C 粘土纹层的扫描电镜照片, 其中深色部分为陆源物质丰富的粘土纹层; D 有机纹层的扫描电镜照片, 其中深黑色的为有机纹层; E 层偶的扫描电镜照片, 片中体现两个纹层之间呈渐变过渡关系的层偶; F 层偶的扫描电镜照片, 主要为粘土纹层—有机质纹层层偶; G 层偶的扫描电镜照片, 主要为硅藻—有机质纹层层偶; H 层偶的扫描电镜照片, 主要为硅藻纹层—粘土纹层层偶。A 中镜头盖直径为 6.5cm, B- H 中的比例尺代表 100 μm 。



图版 II 说明 A 层偶的扫描电镜照片, 主要为薄层硅藻纹层—有机质纹层层偶; B 层偶的单偏光镜下照片, 主要为厚层硅藻纹层—有机质纹层层偶; C 层偶的扫描电镜照片, 主要为粘土纹层—硅藻纹层层偶; D 层偶的单偏光镜下照片, 主要为薄层粘土纹层—有机质纹层层偶; E 层偶的扫描电镜照片, 图中箭头示意的是草莓状黄铁矿; F 层偶的单偏光镜下照片, 主要为有机质纹层—厚层粘土纹层层偶。A~F 中的比例尺代表 100 μm 。