

## 河北阳原东目连第四纪叠层石古环境分析

闵隆瑞<sup>1)</sup> 迟振卿<sup>1,2)</sup> 朱关祥<sup>3)</sup> 姚培毅<sup>1)</sup> 牛平山<sup>4)</sup>

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

2) 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境开放实验室, 210008

3) 中国地质科学院, 北京, 100037; 4) 石家庄经济学院资源环境系, 050031

**内容提要** 组成阳原县东目连湖积台地的第四纪“泥河湾层”地层中, 发育多层藻迹层和一层“菜花形”、“锥体状”大叠层石(个体高 20 cm), 大叠层石层延伸 1 km, 构成古藻坪微地貌。经 OSL 和古地磁测试, 大叠层石年龄推测为 220 ka 左右。镜下叠层石片子中见蓝藻门的纤细席藻种 *Phormidium tenue* (Menegh) Genegh 和湖泊鞘丝藻种 *Lyngbya Limnetica* Lemmermann 等。不同形态叠层石反映不同发育阶段, 藻迹发育于高水位边缘部位, 大叠层石发育于高水位与低水位之间边缘部位。亮层和暗层交替出现的纹层构造是组成叠层石的基本结构构造, 它们是由蓝藻丝体生长代谢活动所致。据同位素、磁化率、粒度、地球化学元素、X 衍射、孢粉和生物化石等分析, 认为气候暖干、盐度高及大量苔藓虫、介形虫、龙介科蠕虫等生物存在的环境有利于大叠层石形成。叠层石可能属半咸水湖、滨湖浅水环境, 但据首次在第四纪泥河湾层中发现的苔藓虫和龙介科蠕虫管分析, 其成因是否与海水有过联系尚待进一步研究。

**关键词** 第四纪叠层石 形态和结构 古环境

东目连村位于河北阳原县东南 4 km 处, 叠层石剖面在东目连村东湖积台地西侧, 地理座标: 40° 5' N, 114° 12' E, 台地海拔高度为 880 m。主叠层石层距台地顶部约 10 m 处。

### 1 东目连剖面地层划分

剖面总厚 15.06 m, 自上至下划分为 43 层 5 小段(图 1), 其 5 小段岩性描述如下:

5. 棕红色粉细砂层。厚 0.11 m
4. 底部为黄色含砾中粗砂, 具小型交错层理; 下部为黄色粉细砂层; 中部为黄色粘土质粉砂, 夹灰绿、褐色粘土薄层, 含少量炭化植物根茎; 上部为钙板层和灰绿、褐色粘土互层, 有三层藻迹化石层, 具水平层理和纹层层理。厚 4.99 m
3. 下部为黄、黄绿、黄白色粘土质粉砂层, 夹鲜黄色砂层和部分钙板层、铁质层, 有黑色锰质点; 上部为灰色粘土层, 夹少量鲜黄色砂条带, 具水平层理, 局部有纹层层理。厚 3.5 m
2. 中一下部为黄、灰色中细砂, 夹钙板薄层, 具水平层理和波纹层理; 中一上部为叠层石层和钙、泥质层, 叠层石形态主要为“菜花形”, 次为“锥体形”和藻迹痕, “菜花形”叠层石个体一般高 20 cm; 上部为灰色

粘土夹铁质薄层。厚 4.66 m

1. 灰、灰褐色粉砂、粘土层, 具水平层理, 部分发育纹层层理。厚 1.80 m

按 20 cm 为间距, 对剖面进行古地磁测试(由中国地质科学院地质研究所王永在台北中央研究院地球科学研究所进行的), 大部样品表现为正极性(图 2), 仅在 560~600 cm 和 1400~1480 cm 处, 呈现反极性(?)。据区域地层对比, 本剖面地层应属布容正极性。

对深 1.2 m 处第 4 段上部绿黄色粘土进行 OSL 测试(中国地震局新生代开放实验室测试), 其年龄值为:  $100.38 \pm 9.91$  ka。又据孢粉(中国地震局孢粉实验室严富华研究员鉴定)和介形虫(由石家庄经济学院庞其清教授鉴定)分析, 整个剖面孢粉以针阔叶木本植物为主; 介形虫以 *Limnocythere dubiosa* 为主, 另有少量 *Eucypris inflata*。从孢粉和介形虫组合对比看, 其时代均为中更新世。

综上所述, 本剖面属中、晚更新世的地层。中、晚更新世的界限划在深 5.1 m, 因这里岩石地层界线清楚。若将本区河湖相层按 0.07 mm/a 沉积速率计算, 则叠层石层的年龄约为 220 ka。

收稿日期: 2002-05-27; 改回日期: 2002-07-19; 责任编辑: 王思恩。

作者简介: 闵隆瑞, 女, 1938 年生。1965 年毕业于北京地质学院。现为中国地质科学院地质研究所研究员, 主要从事第四纪、地貌等研究。通讯地址: 100037, 北京百万庄 26 号; 电话: 010-68326714。

| 系   | 统   | 组   | 段   | 层  | 样号      | 岩性柱 | 厚度<br>(m) | 累积厚<br>度 (m) | 岩 性 描 述                                                              |
|-----|-----|-----|-----|----|---------|-----|-----------|--------------|----------------------------------------------------------------------|
| 第四纪 | 更新统 | 泥河湾 | V   | 43 | D1      |     | 0.11      | 0.11         | 褐棕色粉细砂层, 顶部具植物根系                                                     |
|     |     |     |     | 42 | D2~3    |     | 0.19      | 0.3          | 4层Ca板层夹3层灰绿色粘土薄层, 在中间Ca板层层面上有较深的藻迹纹                                  |
|     |     |     |     | 41 | D4      |     | 0.2       | 0.5          | 灰色粘土, 呈小碎块, 具纹层, 层表皮有白色膜和Mn黑点。纹层白色条宽约0.5mm, 灰色条宽约0.2mm               |
|     |     |     |     | 40 | D5上     |     | 0.1       | 0.6          | 灰色与黄色粘土层互层, 灰色层中纹层清晰                                                 |
|     |     |     |     | 39 | D5下~6   |     | 0.3       | 0.9          | Ca板层, 顶部为黄色Ca质泥质层, Ca板厚2-3cm, 表皮有藻迹纹。藻迹纹浅, 呈细长条                      |
|     |     |     |     | 38 | D7上     |     | 0.1       | 1.0          | 褐色粘土, 含较多的炭化植物茎                                                      |
|     |     |     |     | 37 | D7下~9   |     | 0.5       | 1.5          | 绿黄色粘土质粉砂, 夹1.5cm宽的褐色粘土条, 含少量植物根系                                     |
|     |     |     |     | 36 | D10~11  |     | 0.4       | 1.9          | 黄色粘土质粉砂, 致密坚硬, 层理不清。粘土呈碎块状。夹浅绿色粘土条, 条带宽2cm                           |
|     |     |     |     | 35 | D12~13  |     | 0.4       | 2.3          | 灰黄色粘土质粉砂, 夹灰绿色或褐色粘土条, 粘土条宽1.5-3cm                                    |
|     |     |     |     | 34 | D14~17  |     | 0.8       | 3.1          | 黄色粘土质粉砂, 夹褐色粘土条带, 条宽2-5cm, 上部含炭质植物根茎, 下部含白色条和斑点(盐?)                  |
|     |     |     | IV  | 33 | D18~25  |     | 1.6       | 4.7          | 黄色粉砂层, 较疏松                                                           |
|     |     |     |     | 32 | D26~27  |     | 0.4       | 5.1          | 黄色细砂层, 底部5cm为含砾中粗砂, 砾石成分为泥质、石英、岩屑等, 砾径2-3mm, 并见有小型交错层理               |
|     |     |     |     | 31 | D28     |     | 0.2       | 5.3          | 灰色粘土                                                                 |
|     |     |     |     | 30 | D29~30  |     | 0.4       | 5.7          | 灰色粘土层, 夹黄色砂层, 黄色条宽1.5cm                                              |
|     |     |     |     | 29 | D31~32  |     | 0.4       | 6.1          | 灰色粘土                                                                 |
|     |     |     |     | 28 | D33     |     | 0.2       | 6.3          | 灰黄色粘土层, 有锈黄色粉砂条带                                                     |
|     |     |     |     | 27 | D34~35  |     | 0.4       | 6.7          | 灰色粘土, 夹8层以上黄色粉砂透镜体或粉砂层, 含少量炭屑, 具水平层理, 局部为纹层。黄色粉砂层宽3mm, 间距0.5-1.5cm   |
|     |     |     |     | 26 | D36上    |     | 0.1       | 6.8          | 灰色粘土, 夹白色条带, 具水平层理                                                   |
|     |     |     |     | 25 | D36下~39 |     | 0.7       | 7.5          | 黄色、浅黄色粘土质粉砂层, 致密坚硬, 水平层理。顶部夹两条锈黄色粉砂条带, 条带宽2mm                        |
|     |     |     |     | 24 | D40     |     | 0.2       | 7.7          | 钙板层, 厚6cm, 中间夹泥质薄层, 下部Ca板层有Fe质薄层                                     |
|     |     |     | III | 23 | D41     |     | 0.2       | 7.9          | 灰黄绿色粘土, 夹黄色粉砂条带, 具水平层理                                               |
|     |     |     |     | 22 | D42     |     | 0.2       | 8.1          | 灰黄绿色粘土, 含较多Mn小点, 具水平层理, 但节理发育, 敲后呈块状                                 |
|     |     |     |     | 21 | D43~45上 |     | 0.5       | 8.6          | 浅黄白色粘土质粉砂, 中部夹白色条带, 宽1-2mm, 下部夹鲜黄色砂层, 砂层宽0.5cm, 间距2cm                |
|     |     |     |     | 20 | D45下~47 |     | 0.5       | 9.1          | 灰色粘土, 具纹层, 纹层灰白相间, 灰白相间纹层, 2-5mm间距, 夹Fe质薄层                           |
|     |     |     |     | 19 | D48     |     | 0.2       | 9.3          | 灰色粘土层, 具水平层理                                                         |
|     |     |     |     | 18 | D49~50  |     | 0.4       | 9.7          | 灰色粉砂质粘土, 具黄色粉砂条带, 条宽0.5-1cm                                          |
|     |     |     |     | 17 | D51     |     | 0.2       | 9.9          | 3层Ca质泥岩层, 表面呈白色, 但敲开后为黄色, 中夹黄色粘土质粉砂, Ca质泥岩下为薄层灰绿色粘土                  |
|     |     |     |     | 16 | D51~52  |     | 0.2       | 10.1         | 叠层石层, 大叠层石呈菜花状形态, 中间有一间断面, 分上下两期生长, 底座为白色钙质粉末; 小叠层石呈锥状体, 与大叠层石上同期发育。 |
|     |     |     |     | 15 | D52     |     | 0.2       | 10.3         | 鲜黄色中细砂, 水平层理和交错层理, 中间灰色粘土透镜体                                         |
|     |     |     |     | 14 | D53     |     | 0.2       | 10.5         | 灰色粉砂层                                                                |
|     | 全新统 | 新湾  | II  | 13 | D54     |     | 0.36      | 10.86        | 黄色中细砂与灰色粘土互层, 具水平层理, 黄色条宽2-3mm, 灰色条0.5-2cm                           |
|     |     |     |     | 12 | D55~58  |     | 0.8       | 11.66        | 灰色粉砂层, 致密坚硬, 厚层状, 夹两条黄色中细砂, 砂层宽0.5-1cm, 间距0.5cm                      |
|     |     |     |     | 11 | D59     |     | 0.2       | 11.86        | 灰色粉砂层, 底部灰色钙板层, Ca板厚4cm                                              |
|     |     |     |     | 10 | D60~61  |     | 0.4       | 12.26        | 灰色中砂层, 含Ca质较多, 具1-3cm洞穴, 砂成份复杂, 有石英、长石、云母和Ca质砂, 砂层具小波状层理             |
|     |     |     |     | 9  | D62~63  |     | 0.4       | 12.66        | 7层Ca板层, 中间夹中砂, 砂层具小波状层理, Ca板厚0.3-4cm                                 |
|     |     |     |     | 8  | D64~65  |     | 0.4       | 13.06        | 青灰色中细砂层, 以石英砂为主, 另有黑色矿物黑云母等, 厚层状                                     |
|     |     |     |     | 7  | D66     |     | 0.2       | 13.26        | 黄色粉细砂层, 厚层状                                                          |
|     |     |     | I   | 6  | D67~69  |     | 0.4       | 13.86        | 灰色粘土质粉砂, 厚层状                                                         |
|     |     |     |     | 5  | D70     |     | 0.2       | 14.06        | 灰色粉砂质粘土, 厚层状                                                         |
|     |     |     |     | 4  | D71~72  |     | 0.6       | 14.46        | 灰色-灰褐色粘土, 具纹层, 纹层白条宽2mm, 黑条宽0.2mm, 水平层理间距3-4mm                       |
|     |     |     |     | 3  | D73     |     | 0.2       | 14.66        | 灰褐色粘土, 具水平层理                                                         |
|     |     |     |     | 2  | D74     |     | 0.2       | 14.86        | 灰褐色粘土, 夹黄色泥质小团块, 含少量炭质碎屑, 具水平层理                                      |
|     |     |     |     | 1  | D75     |     | 0.2       | 15.06        | 灰褐色粘土, 夹黄色细砂条带, 具水平层理                                                |

图1 河北阳原东目连剖面岩性描述及地层划分

Fig. 1 Stratigraphic division and lithologic description of Dongmulian section in Yangyuan County, Hebei Province

## 2 叠层石中蓝藻体鉴定和叠层石形态、结构构造特征

叠层石(Stromatolites)是由以蓝藻为主的微生物生长代谢活动所导致的,通过对沉积物的捕获、粘附和沉淀产生的生物沉积结构。(梁玉左等,1995; Walter et al., 1976)。河北阳原东目连叠层石则是迄今为止我国发现的个体最大的第四纪叠层石(闵隆瑞等,1998)。

### 2.1 叠层石宏观特征

东目连叠层石产于第四纪泥河湾组的河湖相地层中。剖面顶部见三层皱纹状藻迹;剖面中一下部深9.9~10.1 m间,是产叠层石的主要层位,叠层石呈大的“菜花形”和“锥体形”产出,有时底部也见有皱纹状藻迹。野外观察叠层石层具以下特征:

(1)单个叠层石连成一片,层位稳定,可延伸1 km左右(图版 I-1)。叠层石层受原始湖盆地形控制,由北向南略有倾斜,实际上已构成一片古藻坪微地貌形态。

(2)叠层石形态以“菜花形”为主,次为“锥体形”和藻迹痕。“菜花形”叠层石一般高20 cm,局部可达30~40 cm,个体下部以柱状为主,向上融汇成大型的包心菜状,平面显露莲花状或菜花状。上、下部之间有一明显间断面,以间断面为界,反映早、晚两期生长期。叠层石内部时而是空心的,时而内含一团砂泥。叠层石外壳质地致密光滑,是由钙质组成的,壳厚0.5~1 cm,呈黄白色,顶部有时因受风化,呈灰黑色。“锥体形”叠层石表面具明显小的瘤状突起,且有小孔不规则分布,由几层小锥体平等生长,向上融汇成较大个体,呈假山状,这种叠层石含泥砂量较多,因而导致较疏松,易碎。藻迹痕,呈弯曲的长条形,似蠕虫状。

(3)叠层石具多期生长的特点。主叠层石层中三种不同形态的叠层石反映三个不同的生长期。早期发育皱纹状藻迹;中期为“菜花形”大叠层石下部发育期;晚期为“菜花形”大叠层石上部和瘤状“锥体形”叠层石发育期。皱纹状藻迹在本层发育不普遍。“菜花形”叠层石发育早期其分布面有所扩大,但有时其周边仍在沉积钙泥质岩,故在野外见有“穿层”现象(图版 I-2),即叠层石层两边为成层的钙泥质岩。“菜花形”叠层石发育晚期时,在周边的钙泥质岩之上开始发育瘤状“锥体形”叠层石,即“菜花形”叠层石上部与瘤状“锥体形”叠层石是同期发育的,此时,是本叠层石层发育鼎盛期。另外,叠层石发育过

程中还可见到多次小的生长期。如在“菜花形”和“锥体形”叠层石外表见有多个小间断,有的是三个小间断,最多可见六个小间断,它们均应代表小生长期的界线。

### 2.2 叠层石中蓝藻体鉴定

对东目连剖面叠层石切制成大小薄片24件,在生物镜下进行观察、鉴定,确认有蓝藻体(由南京大学博士研究生田友萍鉴定),鉴定有:裂须藻属 *Schizothrix* 和纤细席藻种 *Phormidium tenue* (Menegh) Gomont(图版 I-3),湖泊鞘丝藻种 *Lynbya Limnetica* Lemmermann(图版 I-4)。藻丝体一般呈直立生长,具有一定的方向性,很细,直径约1  $\mu$ ,不分叉,外有钙鞘。这些藻丝体均完整地或断残地保存在叠层石的暗层中,在鞘丝藻的属种中,还明显见有捕获沉积碎屑物的现象,粘结碎屑较多。

### 2.3 叠层石的结构构造

叠层石的横切面表现为亮、暗层相间同心圆形(图版 I-5);纵切面上见亮层与暗层交替出现的弯形的条带状或不连续的条带状。暗层与亮层间距有时等同,但多数情况下不等。总之,亮暗层条带一般在0.5~4 mm间。镜下观察亮层为碎屑层,由石英、碳酸盐等颗粒组成;暗层中碎屑颗粒少,主要为含藻碳酸盐岩和有机质。亮暗层界线清晰。另,镜下还见有呈放射状球形、卵形集合体结构等。皱纹状藻迹亮、暗层不显,且以碎屑为主。

## 3 形成叠层石的古环境

对本剖面和叠层石层进行了同位素、磁化率、粒度、地球化学元素、孢粉和生物化石等测试分析研究(图2)。

### 3.1 氧、碳同位素反映的古气候特征

对剖面进行了氧、碳同位素测定(中国地质科学院矿床资源所同位素实验室测试),从图2中看出, $\delta^{18}\text{O}$ 波动于-8.9‰~3.5‰(PDB)和21.6‰~34.5‰(SMOW)之间, $\delta^{13}\text{C}$ 波动于-5.0‰~1.4‰之间。湖泊沉积物中 $\delta^{18}\text{O}$ 值受温度和盐度等影响较大,高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值对应暖干的气候期。故深0.2~0.8 m、8.8 m、9.6~11 m、12 m以下为暖干的气候特点。因此位于10 m处的叠层石层应属暖干时期的产物。 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化主要与生物作用有关,深9.8~10.2 m处是主要叠层石层位,生物作用明显,故 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高。

### 3.2 磁化率反映的古气候特征

湖泊沉积物的磁性强弱受气候、物源、植被、粒

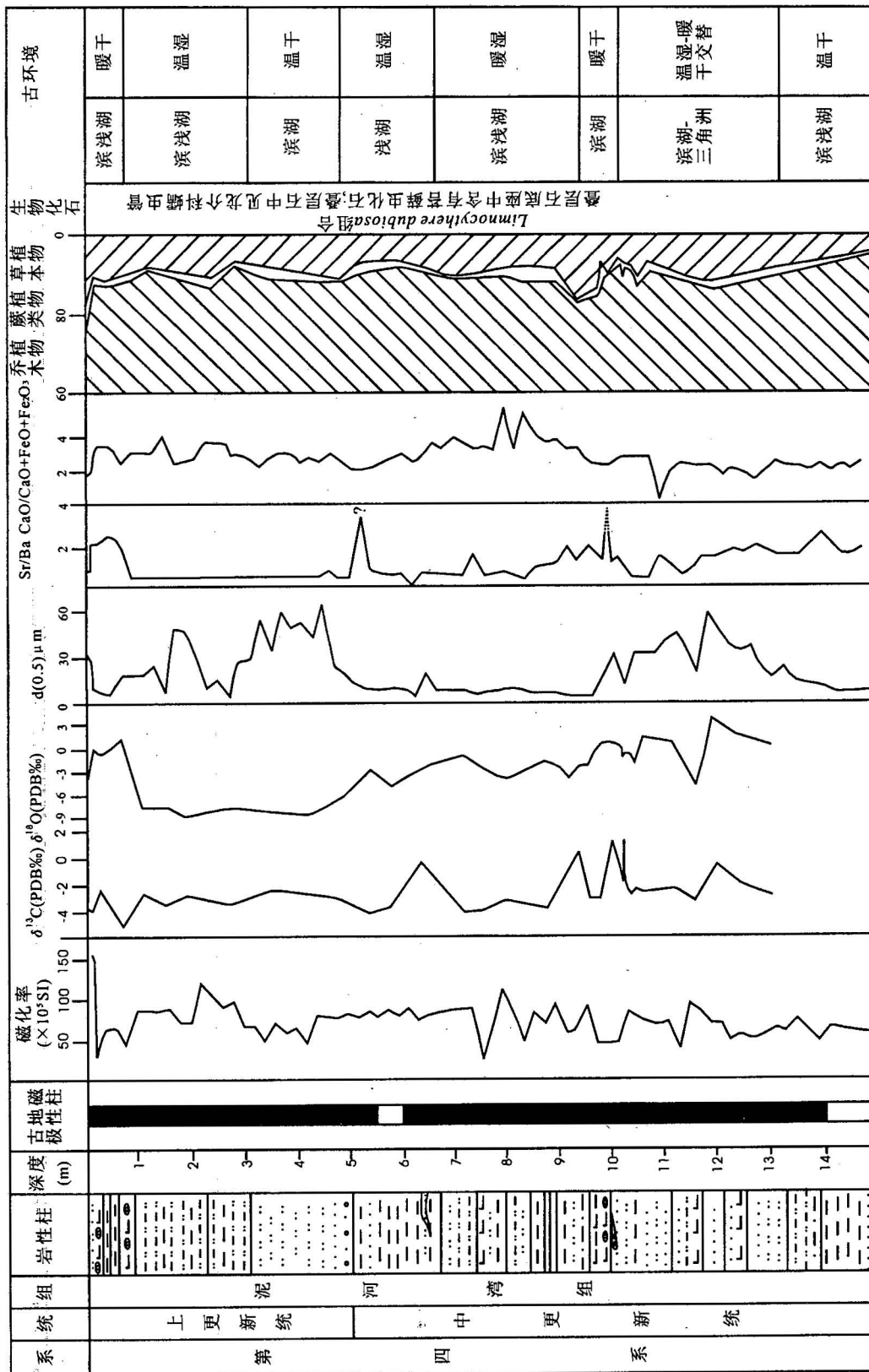


图 2 河北阳原东目连剖面古环境分析  
Fig. 2 Analysis of stromatolite palaeoenvironment in Dongmulian section, Yangyuan County of Hebei Province

度和水位等诸多因素影响,较为复杂。本次工作使用 HKB-1 型磁化率桥进行测量,测得垂向磁化率变化规律如图 2 所示,在 14 cm、80 cm、280 cm、430 cm、740 cm 及 122 cm 处有明显的分界。从图中看出,磁化率强度与 Sr/Ba 值呈较明显的负相关,盐度升高,磁化率强度减弱,反之,磁化率增强。叠层石层处,磁化率是低值,故反映此时盐度较高。

### 3.3 沉积物粒度反映的古环境

湖水物理能量是控制沉积物粒度分布的主要因素,粗粒和细粒沉积物分别代表了湖水水动力的强和弱,也就是分别代表了湖泊的高水位期及低水位期。细颗粒指示湿润气候,水位较高;粗颗粒指示干旱气候,水位较低。现以  $d(0.5)\mu\text{m}$  为例(图 2),深 0~0.16 m 中值粒径为 30~40 $\mu\text{m}$ ;深 0.16~1.5 m,为 7~2.5 $\mu\text{m}$ ;深 1.5~2.2 m,为 20~50 $\mu\text{m}$ ;深 2.2~3.2 m 为 6~30 $\mu\text{m}$ ;深 3.2~5.1 m 为 20~60 $\mu\text{m}$ ;深 5.1~9.9 m 为 4~13 $\mu\text{m}$ ;深 9.9~13.5 m 为 11~50 $\mu\text{m}$ ;深 13.5~15.6 m 为 4~15 $\mu\text{m}$ 。从而明显地看出剖面记录了 4 次由细变粗的旋回,表明水位存在 4 次升降,反映湖泊有 4 次浅湖至滨湖的扩张到收缩过程。而其中叠层石层属于粗颗粒范围,反映干旱气候,水位较低的滨湖相古环境。

### 3.4 地球化学元素反映的古环境

(1) Sr/Ba 值反映的古环境:据研究, Sr/Ba 值随盐度的提高而有明显增大的趋势。Sr/Ba 值在大陆淡水沉积物中  $<1$ ,在海相沉积物中  $>1$ 。从本剖面 Sr/Ba 值看(图 2),深 0.11~0.9 m 为 1.16~2.68,深 8.6~11.66 m 值  $>1$ ,其中叠层石和它的下伏层特别高,可达 4.2~7.2,深 11.86 m 以下其比值  $>1$ 。总之,剖面的顶部藻迹层和主叠层石层及其以下层中 Sr/Ba 值高,反映水体为海水或半咸水—咸水的沉积环境。

(2)  $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$  值反映的古环境:磷酸盐中  $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$  值随含盐度的变化而作不规律的改变。据经验数值:  $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$  值  $<0.60$  为淡水,而  $>0.89$  为海水。对本剖面该比值测定,基本上均  $>0.60$ ,其含藻迹和叠层石层以及深 11.86 m 以下的地层中,  $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$  值  $>0.80$ ,尤其叠层石层可达 0.89~0.98。反映剖面顶部和中一下部水体中盐度较高。

### 3.5 孢粉反映的古气候特征

本剖面以乔木植物或木本植物花粉为主,可占总数的 73%~93%,灌木及草本植物花粉较少,仅占 5.7%~21.69%,蕨类植物孢子更少,占 0.7%~

5.4%(图 2)。反映本剖面以针阔叶林植被为主的古生态环境,气候热偏湿。但深 13.26 m 以下松属居优势,气候以温干为主。

### 3.6 X 衍射分析反映叠层石的古环境

对“菜花形”和“锥体形”叠层石分别做 X 衍射分析,分析表明前者白云石占 90%,石英占  $<5\%$ ;后者白云石占 65%,石英占 20%,长石占 15%,含铁矿物占  $<5\%$ 。说明叠层石主要成份是白云石,仅“锥体形”叠层石含碎屑矿物略多些。而湖泊白云石形成的环境,应代表气候条件较热,蒸发量较大,较为干旱的古环境。

### 3.7 介形虫化石反映的古环境

本剖面以 *Limnocythere dubiosa* Daday 为特征的介形虫化石组合,伴有 *Eucypris inflata* (Sars)。这两个属种,有较高的耐盐性,反映半咸化的水体沉积环境。在叠层石下伏层中均有大量介形虫化石,构成介形虫化石层。在叠层石个体中还见有介形虫化石,因此,叠层石发育前期及发育期间应属半咸化的水体环境。

### 3.8 苔藓虫和龙介科蠕虫管反映的古环境

“菜花形”叠层石底座为灰色钙质粉砂质粘土和鲜黄色含砾粉细砂层,含丰富的介形虫化石,具明显的波状、交错层理。经野外观察,部分地区,直接与叠层石底座接触的沉积物为一层白色的粉末,这白色粉末经室内 X 衍射分析,其中霏石较多,占 30%。镜下鉴定,含较多苔藓虫化石(由中国科学院南京古生物研究所胡兆珣和国土资源部地质博物馆方晓思鉴定)(图版 I-6),可见,叠层石与苔藓虫生物层关系密切。另外,在瘤状“锥体形”叠层石的手标本中,见有龙介科蠕虫管(由中国科学院南京古生物研究所曹瑞骥鉴定)。苔藓虫化石和龙介科蠕虫管是本次工作过程中首次在我国第四纪陆相地层中发现的,它们反映的环境,尤其与海水是否有关?尚待进一步研究。

## 4 叠层石形成机理探讨

通过对叠层石宏观观察、微观研究和叠层石形成的古环境分析,对东目连叠层石形成机理有以下几点认识:

(1) 沉积环境不同部位及水动力条件的差异,是形成叠层石的不同形态的主要因素。据观察,皱纹状藻迹一般出现在钙板层的顶面,位于高水位线边缘,经常暴露地表,因而这些部位不利于叠层石向上发展。大叠层石出露的位置应在高水位线与低水位



线之间,含碎屑和生物较多,水动力相对较弱,故能形成大叠层石,并具多期生长的特点。从叠层石层下部藻迹层→上部“菜花形”、“锥体形”叠层石,反映由水进→水退的过程。

(2) 较高的温度和盐度及大量生物存在有利于叠层石生长。① 叠层石生长与温度有关:现代叠层石多发现在热带或亚热带地区,如:澳大利亚海岸、波斯湾及中国海南岛等地。又据对现代叠层石室内培养结果表明(王自强等,1982),当最高温度低于 $12\sim 15^{\circ}\text{C}$ 时,蓝藻停止生长,处于“休眠”状态。可见,叠层石生长与温度有关,温度偏高的情况下有利于叠层石生长发育。据孢粉和氧、碳同位素分析结果,本剖面叠层石发育期间,孢粉以乔木植物花粉为主,反映气候较热;氧、碳同位素均处于高值,表明叠层石生长期间蒸发量高,气候较干热。正由于这种气候条件,该区形成了分布较广,层位稳定,个体巨大的独特的国内罕见的第四纪半咸湖相或与海水曾有过联系的叠层石古藻坪。② 含盐度高,促进叠层石发育:现代叠层石在海相、泻湖、咸水—半咸水及淡水中都有分布,如我国近年来在贵州黄果树和四川九寨沟等地发现了淡水叠层石(田友萍等,2000),但淡水叠层石均依附于钙华表面,与沉积物紧密结合在一起,形成钙华生物层,且这种淡水叠层石个儿一般较小。而本剖面中叠层石层,从化学分析、碳同位素和生物化石分析表明, $\text{Sr/Ba}$ 和 $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$ 值较高, $\delta^{13}\text{C}$ 值较高,介形虫以半咸水为主,龙介科蠕虫管和苔藓虫可能与海水有关,这表明沉积物盐度高,有利于叠层石生长,即有利于叠层石向波浪基准面延伸,从而生长为较大的叠层石。③ 叠层石发育与生物层关系密切:从双目镜下观察,叠层石下伏沉积物中含有大量生物化石,主要有介形虫、苔藓虫和龙介科蠕虫管等,它们分别构成了生物层。这些生物含有充足的 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$ 等成分,这为蓝藻捕获、粘结 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$ 颗粒形成大叠层石提供了物质基础。总之,正是由于气温较高,盐度较高,生物丰富,在水体不太深的部位,光照充足等诸多因素,才形成了个体巨大的国内罕见的独特的东目连叠层石藻坪。

(3) 叠层石中亮层和暗层交替出现的纹层是组成叠层石的基本结构构造。现代叠层石研究表明,丝状蓝藻具有趋光生长运动的特征,丝状蓝藻的昼夜趋光运动形成了亮层和暗层的结构特征,纹层代表的时间长度为一天。但实际上叠层石纹层代表的时间长度不尽相同,要视具体情况而定(Walter et al.,

1976; Monty, 1976)。对本剖面叠层石宏观、微观的观察,亮层主要由石英等碎屑组成,暗层主要由蓝藻、有机质及碳酸盐岩组成。推测,春夏时水动力较强,气温等又适宜藻类活动,在沉积石英等粗粒碎屑物同时,还由于藻类新陈代谢活动,即因光合作用吸收了大量 $\text{CO}_2$ ,而沉淀出 $\text{CaCO}_3$ 成分的方解石、文石等浅色矿物,故此时构成了浅色层;到了秋冬时期,大量藻类因不适应当时气温等条件,而死亡、沉淀,同时与吸附在藻丝、藻球表面的有机质和钙质结壳层一起沉淀,此时构成了暗色层。这样亮层和暗层构成的一对纹层,其时间长度应为一年。一年又一年的藻类生存至死亡的活动,致使年纹层叠加生长,从而形成了具有这种特殊结构的叠层石。至于结壳现象这是一个很重要的现象,在本叠层石片子中可以常见于藻丝体有钙鞘和藻球外表钙化的现象。这种现象的形成可能与藻类捕获、粘结 $\text{CaCO}_3$ 颗粒有关,也可能与藻类分泌碳酸钙的作用有关,也可能由于多方面共同作用导致而成。

## 5 结论

(1) 东目连叠层石是我国第四纪中少见的微生物和沉积作用共同形成的产物。其形态以“菜花形”为主。叠层石剖面的地质时代属于第四纪更新世中—晚期,推算叠层石年龄为220 ka左右。

(2) 东目连叠层石主要由蓝藻生长代谢活动所致,镜下鉴定确认有蓝藻体,并鉴定出,裂须藻属和纤细席藻种、湖泊鞘丝藻种等。另在叠层石及其下伏层中见有大量介形虫,以及首次在我国第四纪河湖相地层中发现的苔藓虫和龙介科蠕虫管。

(3) 叠层石中亮层和暗层交替出现的纹层构造是组成叠层石的基本结构构造。亮层由石英、碳酸盐碎屑矿物组成;暗层由蓝藻体、有机质和藻体外表的钙鞘或结壳组成。叠层石中呈放射状球形、卵形集合体结构的成因尚待进一步探讨。

(4) 不同形态叠层石反映不同的发育阶段。藻迹层位于高水位边缘部位,“菜花形”和“锥体状”大叠层石位于高水位和低水位之间的边缘部位。从藻迹层→大叠层石层,由水进→水退的过程。

(5) 经同位素、磁化率、粒度、化学分析、孢粉和生物化石等的测定、鉴定结果,剖面中主叠层石 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值高,磁化率值较低,粒度较粗, $\text{Sr/Ba}$ 和 $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$ 值较高,X衍射分析其主要成分为白云石,孢粉以乔木为主,介形虫为*Limnocythere dubiosa*—*Eucypris inflata*组合,叠层石中含龙介科蠕

虫管,叠层石底座中见有大量苔藓虫碎片等,这些均反映叠层石适宜于温度较高、蒸发量较大的气候条件,叠层石的形成与苔藓虫、介形虫、龙介科蠕虫等生物联系密切,生长的水体和位置应属半咸水的滨湖浅水环境或可能与海水曾有过联系的环境。

总之,通过对阳原东目连泥河湾层中的第四纪叠层石及其含叠层石层剖面的综合分析、研究,再次证明第四纪泥河湾中发育叠层石(李容全等,1992;夏正楷,1993),镜下见有蓝藻菌丝体(可定到属种)。同时,对第四纪泥河湾组中叠层石形成的宏观、微观特征和形成古环境条件有了进一步了解和新的认识。尤其是首次在叠层石底座中发现的苔藓虫动物化石和龙介科蠕虫管,不但证明叠层石形成与这些微生物关系密切,也为今后研究阳原盆地第四纪古地理环境提供了一个不可忽视的生物证据。

### 参 考 文 献

- 李容全,袁宝印. 1992. 泥河湾地区更新世叠层石的发现. 地质科学, 1: 97~99.
- 梁玉左,朱士兴,高振家,等. 1995. 叠层石研究的新进展—微生物岩. 中国区域地质, (1): 57~66.
- 闵隆瑞,迟振卿,朱关祥,等. 1998. 阳原县河湾地层中的新发现. 第四纪研究, (2): 183.
- 田友萍,何复胜. 2000. 川黔地区地表钙华中发现现代淡水叠层石及其藻席. 地质评论, 46(5): 549~555.
- 王自强,全秋琦. 1982. 宜昌峡东地区的现代叠层石. 地质科学, (4): 403~406.
- 夏正楷. 1993. 泥河湾层中叠层石的发现及其古环境意义. 中国科学(B辑), 23(8): 874~879.

### References

- Li Rongquan, Yuan Baoyin. 1992. Discovery of Pleistocene stromatolites in Nihewan area, Hebei Province. Scientia Geologica Sinica, (1): 97~99 (in Chinese with English abstract).

- Liang Yuzuo, Zhu Shixing, Gao Zhenjia, et al. 1995. New progress in the study of stromatolites — microbialite. Regional Geology of China, (1): 57~66 (in Chinese with English abstract).
- Monty C L V. 1976. The origin and development of cryptalgal fabrics. In: Walter M R, ed. Stromatolites. Elsevier Amsterdam, 193~249.
- Min Longrui, Chi Zhenqing, Zhu Guanxiang, et al. 1998. New discovery in Nihewa bed, Hebei Province. Quaternary Sciences, (2): 183 (in Chinese with English abstract).
- Tian Youping, He Fushen. 2000. Present freshwater stromatolites and their algal mats in surface calcareous tufa in Sichuan and Guizhou area. Geological Review, 46(5): 549~555 (in Chinese with English abstract).
- Walter M R, Banld J, Brock T D. 1976. Microbiology and morphogenesis of columnar stromatolites (conophyton, vecerrina) from hot springs in Yellowstone National Park. In: Walter M R, ed. Stromatolites Elsevier, Amsterdam, 273~310.
- Wang Ziqiang, Quan Qiuqi. 1982. Present stromatolites in Xiadong area, Yichang of Hubei Province. Scientia Geologica Sinica, (4): 403~406 (in Chinese with English abstract).
- Xia Zhengkai. 1993. Discovery of stromatolites in Nihewan bed and its palaeoenvironmental significance. Science in China (Series B), 23(8): 874~879 (in Chinese).

### 图 版 说 明

1. 河北省阳原县东目连第四纪叠层石景观。
2. 河北省阳原县东目连叠层石生长“穿层”现象。
3. 河北省阳原县东目连叠层石中纤细席藻种 *Phormidium tenue* (Menegh) Gomont  $\times 20$  10s。
4. 河北省阳原县东目连叠层石中湖泊鞘丝藻种 *Lyngbya Limnetica* Lemmermann  $\times 40$  16s。
5. 河北省阳原县东目连叠层石横切面亮层与暗层结构构造  $\times 40$ 。
6. 河北省阳原县东目连叠层石层底座(粉砂层)中的苔藓虫化石  $\times 40$ 。

## Analysis of the Palaeoenvironment of Quaternary Stromatolites at Dongmulian, Yangyuan County of Hebei Province

MIN Longrui<sup>1)</sup>, CHI Zhenqing<sup>1,2)</sup>, ZHU Guanxiang<sup>3)</sup>, YAO Peiyi<sup>1)</sup>, NIU Pingshan<sup>4)</sup>

1) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

2) Lake Sedimentation and Environment Lab., Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing, 210008

3) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

4) Faculty of Resources and Environment, Shijiazhuang Economic College, Shijiazhuang, 050031

### Abstract

The Dongmulian Section, 15.06 m in thickness, is located at Dongmulian Village of Yangyuan County, Hebei Province. The geographic coordinate of the section is 40°5'N and 114°12'E, and its elevation is 880 m a. s. l. Three algae imprint layers are discovered between 0.11 and 0.9 m from the top of the section. One big stromatolite bed with one algae imprint layer appearing occasionally at the bottom is discovered between 9.9 m and 10.1 m. Big cabbage-like and cone-like stromatolites, 20 cm high, construct ancient algae mats, which extend about 1 km. Stromatolites, dated 220 ka BP according to the OSL and Palaeomagnetism results, were discovered in lacustrine deposits, Nihewan Bed. Multiplicate proxies for the stromatolites are tested below:

The  $\delta^{18}\text{O}$  values of carbonate in lacustrine sediments change from 30.7‰ to 31.3‰ (SMOW),  $\delta^{13}\text{C}$  from -1.8‰ to 0.9‰, magnetic susceptibility values from  $40 \times 10^{-6}$  SI to  $48 \times 10^{-6}$  SI, medium grade from 20 to 25  $\mu\text{m}$  and the Sr/Ca ratio from 5.7 to 7.2. The content of dolomite is more than 90% and quartz less than 5% in cabbage-like stromatolites by X-ray diffraction analysis, whereas dolomite 65%, Quartz 20%, feldspar 15% and minerals with iron less than 5% in cone-like stromatolites. Sporopollen analysis yields 88.6%~89.0% ligneous plant pollen, 7.3%~10.2% herb and shrubs pollen, and 4.1%~0.8% fern spore. The ostracode shells are dominated by *Limnocythere dubiosa* companying with *Eucypris inflata*. Vermes have been discovered in stromatolite specimen, and lots of *Bryozoa* fossil discovered in silt of the base of stromatolites. Warm-dry climate, strandline lake, violent evaporation and high salinity are best conditions for stromatolites to form; or the basin was joined with sea during the time when the stromatolites were growing according to comprehensive analysis. The stromatolites are formed by microbial activities of blue algae. *Phormidium tenue* (Menegh) Gomont *Lyngbya limnetica* lemmermann and *Chroococcaceae* or *Nostocaceae* of blue algae are discovered in stromatolite slices. The basic structure of the stromatolite columns is characterized by alternations of light and dark laminae, which are formed by metabolism of blue algae. Light laminae constituted by quartz and fragmental products of carbonate, is formed in spring or summer when blue algae are suitable to live and grow. Dark laminae constituted by blue algae, organic and calcareous guard or crust outside algae is formed in autumn or winter when algae are dead to deposit. Calcareous guard or crust is made of calcium carbonate that is excreted or captured or felted by blue algae.

**Key words:** Quaternary stromatolite; form and structure; Palaeoenvironment

~~~~~



