

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.02.012

# 渤海西部海域晚更新世以来的孢粉组合及古环境变化

李杰, 李日辉, 杨士雄, 陈晓辉, 陈珊珊

国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

**摘要:**通过对渤海西部海区 TJC 孔 55.34m 以浅地层岩性、测年及孢粉分析等研究,发现该海域晚更新世 MIS 5 以来的孢粉组合呈现针叶-阔叶-草本规律的旋回性变化,此特征变化是植被-气候-海平面共同作用的结果,气候暖湿、干(凉)冷交替频繁,海平面波动显著。MIS 5e、MIS 5c、MIS 5a、MIS 3 及 MIS 1(中全新世)阶段气候温暖湿润,陆区则发育针阔叶混交林或落叶阔叶混交林植被,近岸分布有湖沼植被和盐生草地,整体属于高海平面时期的滨海或滨岸浅海环境。MIS 2 冰盛期沉积较薄, MIS 5d、MIS 5b、MIS 4 和 MIS 2 阶段,气候偏冷(凉),以草本蒿和藜为主,陆区发育森林草地或针阔叶混交林草地,海平面较低。

**关键词:**孢粉;古环境变化;晚更新世;渤海西部

**中图分类号:**P736.22

**文献标识码:**A

## Pollen spore assemblages and induced palaeoenvironmental changes in the western Bohai Sea since Late Pleistocene

LI Jie, LI Rihui, YANG Shixiong, CHEN Xiaohui, CHEN Shanshan

Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resource and Environment Geology, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

**Abstract:** The comprehensive study of the upper 55.34m of core TJC-1 taken from the western Bohai area on sediment lithology, multi-method dating and high resolution spore-pollen data suggests that the changes in pollen assemblage since late Pleistocene are resulted from the joint effects of vegetation, climate and sea-level changes. Conifers, broad-leaved trees and herbs show a regular and cyclic pattern of variation, which indicates a frequent alternation of warm-wet and cold(cool) dry climatic conditions, in addition to significant sea level fluctuation. During the periods of MIS5e, MIS5c, MIS5a, MIS3 and MIS1 (early-middle Holocene), mixed coniferous or deciduous broad-leaved forest were developed in the surrounding upland, and lacustrine-halobiotic grass prevailed on the coastal lowland in warm-wet conditions, indicating a coastal or shallow sea environment. There is a thin layer of LGM deposits in MIS2. During the periods of MIS5d, MIS5b, MIS4, and MIS2, conifers prevailed on the upland, and Artemisia-Chenopodiaceae dominated herbs in the lowland area under a cold(cool)-dry climate and low sea level.

**Key words:** pollen and spore, palaeoenvironment; late Pleistocene; western Bohai Sea

渤海西部沿岸河流携带大量泥砂入海,在长期持续的沉降过程中保存了较厚的第四纪沉积物,为研究该海域过去的环境变化提供了良好的材料<sup>[1]</sup>。孢粉是研究气候环境变化的重要指标。通过研究海区钻孔沉积物的孢粉组合特征变化,不仅能够追溯陆缘区地质时期的古植被状况,还可以为海-陆气候与环境的变化提供证据<sup>[2,3]</sup>。迄今,渤海海域、海岸三角洲及沿岸平原的孢粉学研究集中于 20 世纪 80

年代,以往三十余年的孢粉学分析工作多数分辨率较低,且缺少地层的测年数据<sup>[4-13]</sup>。因此,建立精细年代地层框架,提高孢粉记录的分辨率十分必要<sup>[14]</sup>。本文依据 1/100 万天津幅海洋区域地质调查项目在渤海西部海区钻探获取 TJC-1 孔<sup>[15]</sup>,对钻孔 55.34m 以浅地层(另命名为 TJC-1-1)进行较高分辨率的孢粉分析,旨在揭示研究区近岸晚更新世以来的植被演替、气候及海平面变化过程。

**资助项目:**国家自然科学基金青年基金“根据现代孢粉传播机制探讨辽东湾北部海域全新世物质来源及陆缘植被变化”(41506062);国家自然科学基金青年基金“南黄海中北部泥质区高分辨率全新世孢粉记录的环境变化”(41406069);国土资源部海洋地质调查专项(GZH201200503, GZH201400205)

**作者简介:**李杰(1984—),女,助理研究员,博士,主要从事海洋孢粉和第四纪地质研究, E-mail: lijie308480@126.com

**通讯作者:**杨士雄(1982—),男,副研究员,博士,主要从事古生物和海洋地质研究, E-mail: ysx\_666@163.com

**收稿日期:**2017-01-04; **改回日期:**2017-04-30。 文凤英编辑

## 1 研究区概况

渤海主体由辽东湾、渤海湾、莱州湾、中央盆地和渤海海峡组成。渤海海底从渤海湾顶向渤海中央倾斜,平均水深小于 20m。西部沿岸的黄河、滦河和海河等河流向渤海输入大量沉积,在沉积环境动力的影响下,海底沉积物以细颗粒的粉砂与淤泥为主<sup>[1]</sup>。

渤海及沿岸地区属于暖温带季风气候,冬季寒冷晴燥,盛行东北偏北风,夏季高温多雨,盛行西南偏南或东南风,年平均温 9.0~12.5℃,年降水量 500~900mm。根据中国植被区划,渤海周边陆地属于暖温带落叶阔叶林和灌丛草原亚带,区内落叶阔叶林的建群种多为栎树,如辽东栎、槲、麻栎和栓皮栎等,次优势种为多种松树,如生长于沿海湿润地带的赤松和分布于较为干燥的华北平原地区的油松;在平原地区除油松外,还有散生的臭椿、栾树、桑等落叶阔叶树,其他阔叶树如桦、杨、槭、椴和鹅耳枥等生长于丘陵和低地;沿海盐碱滩地以草本植物藜和蒿为主;其他草本植物以禾本科和菊科植物为多,常见灌木有酸枣、荆条和多种鼠李,而针叶树种侧柏和油松都是优势种<sup>[16]</sup>(图 1)。

## 2 材料和方法

1/100 万天津幅海区地质调查项目,在渤海西部施工 TJC-1 钻孔(38°43′55.72″N、118°57′9.75″E,水深 26m),孔深 200.30m。本研究集中在岩心上部 55.34m 地层,命名为 TJC-1-1 孔,其北侧邻近滦河水下三角洲沉积体系。

根据 TJC-1-1 岩心岩性及沉积构造特征,选取其中 11 个层位的混合有孔虫壳体和 3 个层位的泥炭样品,在美国 Beta 实验室进行 AMS<sup>14</sup>C 年代测定,年龄数据利用 Calib7.0.4 软件进行校正获得日历年龄<sup>[17]</sup>。另外挑选不同深度的 14 个样品,由中国科学院兰州分院分析测试中心盐湖化学分析测试部对细颗粒石英进行光释光(OSL)测年分析。

依据岩性变化,按照平均取样间隔 40cm,共取 134 个样品进行孢粉分析。孢粉提取在中国地质科学院水文地质环境地质研究所孢粉实验室内进行,依据样品沉积物粒度粗细,每个样品称重 40~100g,加入石松孢子用于统计孢粉浓度,并采用常规的酸碱处理和重液悬浮相结合提取孢粉<sup>[18]</sup>。在光学显微镜 40 倍目镜下每样制作 1—3 个薄片进行鉴定,多数样品统计数大于 300 粒。所有样品都进

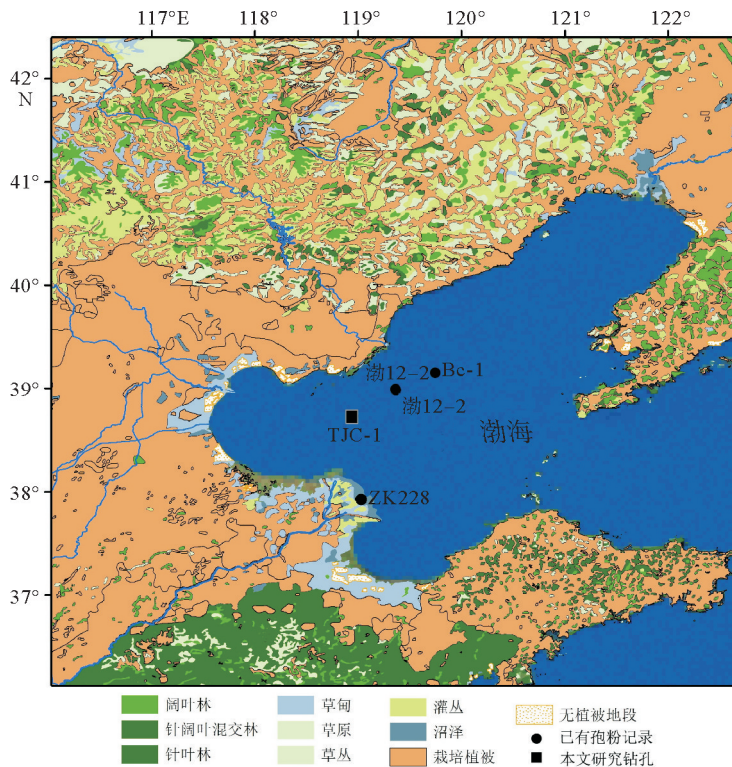


图 1 渤海 TJC-1 孔和其他孢粉研究钻孔位置及沿岸植被分布

Fig.1 Location of TJC-1 core and other pollen records in the Bohai Sea and its surrounding vegetation landscape

行了浓度计算,仅孢粉鉴定统计数大于 60 粒的样品(101 个)参与百分比计算,草本、木本花粉和蕨藻类孢子的百分比计算以统计的孢粉总和为基数,且由 Tilia 软件绘制孢粉百分比图,利用 CONISS 对孢粉图谱进行聚类划带<sup>[19]</sup>。

3 结果

3.1 岩性与年代框架

钻孔岩性变化显著,几段黄褐色沉积物显示了

陆源河流作用增强,几个泥炭薄层则指示了河流冲积、再搬运的植物碎屑搬运到河口环境,可视为相对较低海平面时期的沉积,视为海侵基底泥炭层。结合对钻孔岩心中侵蚀界面的考虑,将全孔自上而下划分为 5 个沉积单元,具体岩性及沉积构造变化详见图 2。相关 AMS <sup>14</sup>C 及 OSL 测年结果见表 1、2,其中早于 20~25kaBP 的<sup>14</sup>C 测年数据,业内一般不做过多精确年代的讨论。

为了建立较精确的有序年代框架,参考已有研究<sup>[20]</sup>,本文进行了对测年数据的筛选。

DU1(0~15.63m)底部15.56~15.63m处泥

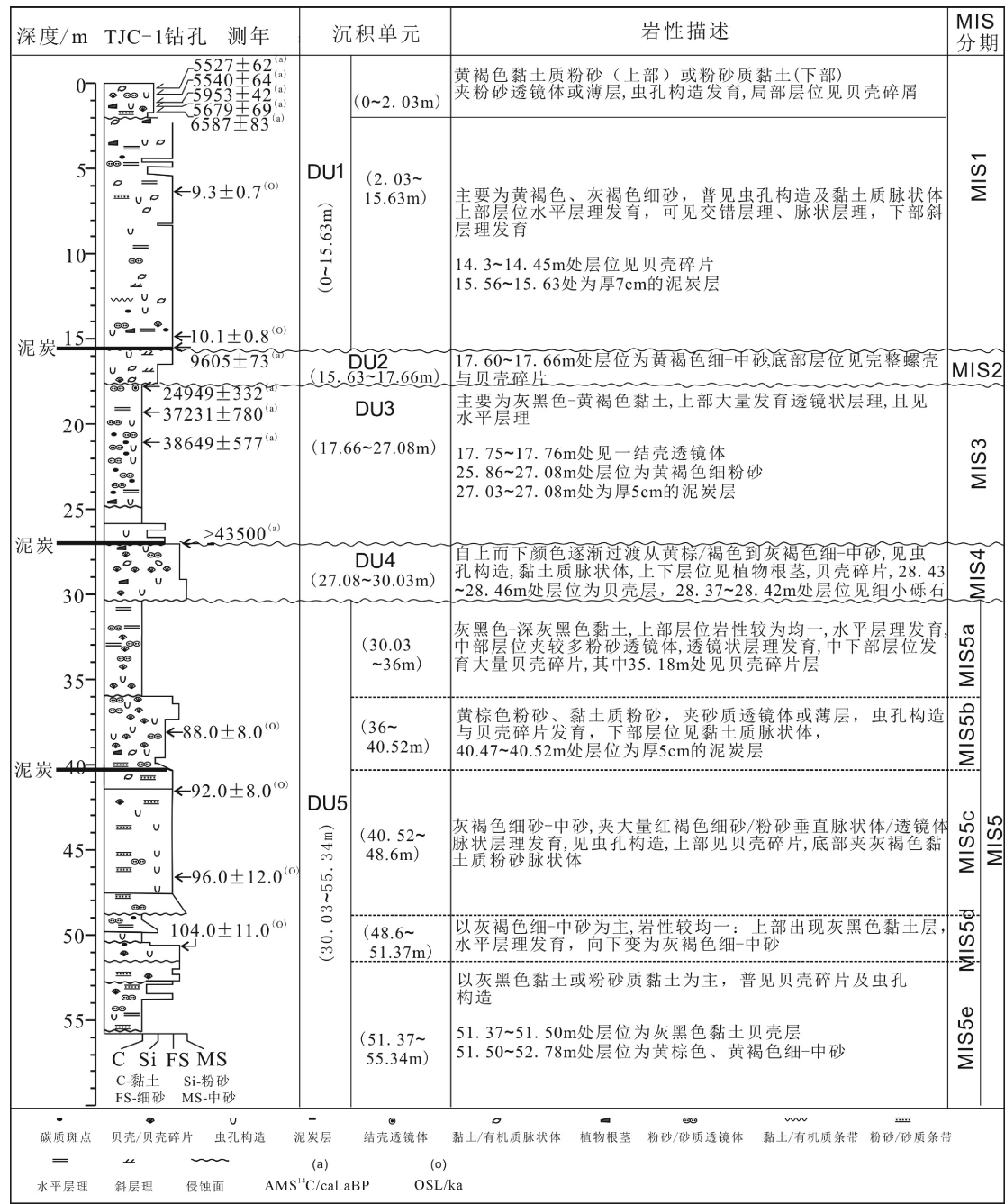


图 2 TJC-1 孔不同沉积单元岩心岩性描述

Fig.2 Lithology of different depositional units of TJC-1 core

炭沉积测年数据为 9605 cal. aBP, 与前人在渤海沿岸获取的大量钻孔的泥炭层的测年数据<sup>[21,22]</sup>一致; 同时, 泥炭层附近 14.98m 处 OSL 测年数据  $10.1 \pm 0.8$  ka 也印证泥炭层作为全新世海侵基底的可靠性。因此, 对 DU1b 泥炭层以上 10.64 和 4.74m OSL 年龄 ( $11 \pm 1.0$ ) ka 和 ( $11.3 \pm 0.9$ ) ka 的数据予以舍弃。判断 DU1 保存了早全新世海侵早期和中全新世高海面的沉积。依据岩心岩性变化可以划分为 DU1-1 (0~2.03m) 和 DU1-2 (2.03~15.58m) 亚单元。

DU1-1 (0~2.03m) 为黄褐色-灰褐色黏土质粉砂或粉砂质黏土, 5 个有孔虫壳体<sup>14</sup>C 测年数据为 5558~6628 cal. aBP, 表明可能由于沿岸流和底流影响, 该孔顶部缺失了晚全新世沉积。该层段所见海相微体生物群丰度很高, 推测 DU1a (0~2.03m) 应为中全新世以来高海平面阶段的沉积, 年龄应以 AMS<sup>14</sup>C 测年结果为准, 舍弃 1.5m 处 OSL 年龄 ( $10.1 \pm 1.0$ ) ka。

DU1-2 (2.03~15.63m) 为黄褐色-灰褐色细砂, 普遍见虫孔和黏土质脉状体; 上部水平层理发育, 亦可见交错层理, 下部见斜层理, 判断属于钻孔北侧临近的水下滦河三角洲沉积。14.30~14.45m 贝壳富集是全新世海侵发生初期海洋动力增强的标志<sup>[21]</sup>。该单元内获得 5387 cal. aBP 和 5424 cal. aBP 两个有孔虫壳体<sup>14</sup>C 测年, 与上覆 DU1 单元测年共同显示了快速堆积过程。鉴于<sup>14</sup>C 测年材料皆有被新碳、老碳污染的可能, 为建立自下而上理想的渐次沉积-堆积的层序, 故舍弃 13.56 和 7.32m 的 AMS<sup>14</sup>C 测年数据 ( $5696 \pm 55$ ) cal. aBP 和 ( $5366 \pm 41$ ) cal. aBP; 保留 6.41m 深度的 OSL 年龄 ( $9.3 \pm 0.7$ ) ka。

DU2 (15.63~17.66m) 沉积物粒度向下变细, 斜层理发育, 底部见完整腹足类和双壳类碎片, 海相微体生物几乎缺失, 表明此层段整体水动力较强。此段上界为全新世海侵开始的标志层——泥炭层, 下界附近 17.90m 处 AMS<sup>14</sup>C 年龄为 ( $24948 \pm 331$ ) cal. aBP, 因而 DU2 为 MIS 2 阶段保存的部分沉积。

DU3 (17.66~27.08m) 沉积物以灰黑色-黄褐色黏土为主。底部粒度偏粗为黄褐色细粉砂, 且底板 27.03~27.08m 处发育泥炭层。此段沉积上部 17.66~24.82m 沉积物粒度偏细, 岩性较均一, 水平层理发育, 埋藏微体生物丰富, 其顶板埋深 17.88m 处临近于上部侵蚀界限, 且测年结果显示为 ( $24948 \pm 331$ ) cal. aBP; DU3 底部泥炭层与 MIS 1 阶段类似, 皆属于海侵层的基底泥炭, 这一现象在渤

海湾及沿岸的许多钻孔 30m 左右深度均有出现, 故推测 DU3 上部为 MIS 3 阶段约 40 cal. kaBP 以来保存的海侵沉积<sup>[21,23]</sup>。因而, 舍弃埋深 18.54m 处 AMS<sup>14</sup>C 测年结果 ( $40658 \pm 648$ ) cal. aBP, 保留其下部 19.36 和 21.08m 样品年龄结果, 分别为 37231 cal. aBP 和 38649 cal. aBP。底界 27.03~27.08m 的泥炭沉积为 MIS 3 阶段海侵基底标志层, 而 27.06m 处样品测年数据已超出<sup>14</sup>C 测年方法的上限 ( $> 43500$  cal. aBP), 仅可作为参考。下部 23.28、24.47 和 26.14m 三处埋深的 OSL 年龄均超过 80 ka, 暂存疑不使用。因而, DU3 主要属于 MIS 3 阶段中晚期的海侵沉积。

DU4 (27.08~30.03m) 以黄棕色、灰褐色细-中砂为主, 上下层位有植物根系, 由下而上变细, 且此段沉积上部未发现微体生物标本, 横向对比附近 Bc-1、BH08 孔, 推测此层段为 MIS 4 阶段突发的河口坝沉积, 因而舍弃 28.23m 处的 OSL 测年数据 ( $84.0 \pm 8.0$ ) ka。

DU5 (30.03~55.34m) 沉积层较厚, 岩性和颜色变化较大。在渤海 BH08 孔已经以沉积物色度变化曲线经天文调谐, 得到与海洋氧同位素分期基本一致的曲线<sup>[24]</sup>, 而且依据微体生物分析鉴定确定的海侵层与之也有很好的配合<sup>[25]</sup>。DU5 单元亦有类似的由颜色显示的氧化-还原状况交替现象。基于海域钻孔地层可能为连续沉积的考虑, 加之 50.66m 以及 56.32m 分别获 OSL 测年 ( $104.0 \pm 11.0$ ) ka 和  $> (119.0 \pm 12.0)$  ka, 故初步推断该单元为 MIS 5 地层, 且尝试细分为 5 个亚单元 (DU5-1—DU5-5)。

DU5-1 (30.03~36.00m): 沉积物为灰黑色-深灰黑色黏土, 有机质积累较高, 中下部见大量贝壳碎片, 推测此亚单元相当于 MIS 5a; 34.09m 所获 ( $94 \pm 10$ ) ka 似乎偏老, 暂予舍弃。

DU5-2 (36.00~40.20m): 黄棕色粉砂、黏土质粉砂, 夹砂质透镜体与薄层, 虫孔与贝壳碎屑多见, 下部见黏土质脉状体, 底部为 5 cm 厚泥炭, 总体显示陆源河流输入物质较快、较大, 进入海域亦未及充分还原; 38.10m 样 OSL 测年 ( $88 \pm 8.0$ ) ka, 无法解释与 34.09m 所获数据的冲突, 故舍弃。推测此亚单元相当 MIS 5b。

DU5-3 (40.52~48.50m): 灰褐色细砂-中砂, 夹大量红褐色细砂-粉砂的垂直脉状体和透镜体, 见虫孔, 显示了水位下降; 41.50m 和 46.64m 分别获 OSL 测年 ( $92.0 \pm 8.0$ ) ka 和 ( $96.0 \pm 12.0$ ) ka, 推测此亚单元相当 MIS 5c。

DU5-4 (48.60~51.37m): 上部出现具水平层

表 1 AMS<sup>14</sup>C 测年数据  
Table 1 AMS<sup>14</sup>C dating results

| 样品编号       | 深度/cm     | 材料      | Beta 实验室编号 | AMS <sup>14</sup> C 年龄/aBP | 日历年龄/cal. aBP |
|------------|-----------|---------|------------|----------------------------|---------------|
| TJ01-A6    | 10-12     | 混合底栖有孔虫 | 404961     | 4770±30                    | 5527±62       |
| TJ01-A26   | 50-52     | 混合底栖有孔虫 | 404962     | 4740±30                    | 5540±44       |
| TJ01-A46   | 90-92     | 混合底栖有孔虫 | 404963     | 5200±30                    | 5953±42       |
| TJ01-A68   | 138-140   | 混合底栖有孔虫 | 404964     | 4970±30                    | 5678.5±68.5 * |
| TJ01-A89   | 180-182   | 混合底栖有孔虫 | 404965     | 5800±30                    | 6586.5±82.5   |
| TJ01-A262  | 730-732   | 混合底栖有孔虫 | 404966     | 4720±30                    | 5366.5±41.5 * |
| TJ01-A472  | 1354-1356 | 混合底栖有孔虫 | 404967     | 4980±30                    | 5696.5±55.5 * |
| TJC01-B36  | 1558-1560 | 泥炭      | 367062     | 8630±40                    | 9605±73       |
| TJ01-B118  | 1788-1790 | 混合底栖有孔虫 | 404968     | 20730±70                   | 24948.5±331.5 |
| TJ01-B151  | 1854-1856 | 混合底栖有孔虫 | 404969     | 36020±280                  | 40658±648 *   |
| TJ01-B188  | 1936-1938 | 混合底栖有孔虫 | 404970     | 33050±210                  | 37231±780     |
| TJ01-B270  | 2108-2110 | 混合底栖有孔虫 | 404971     | 34130±240                  | 38649±577     |
| TJC01-C28  | 2704-2706 | 泥炭      | 367063     | > 43500                    |               |
| TJC01-D369 | 4997-4999 | 泥炭      | 367064     | > 43500                    |               |

注: \* 测年数据仅供参考。

表 2 光释光测年结果  
Table 2 OSL dating results

| 样品编号     | 深度/cm | 材料    | 实验室编号 | OSL 年龄/ka  |
|----------|-------|-------|-------|------------|
| TJC-1-2  | 150   | 细石英颗粒 | N-27  | 10.1±1.0 * |
| TJC-1-5  | 474   | 细石英颗粒 | N-28  | 11.3±0.9 * |
| TJC-1-7  | 641   | 细石英颗粒 | N-29  | 9.3±0.7    |
| TJC-1-11 | 1064  | 细石英颗粒 | N-30  | 11.0±1.0 * |
| TJC-1-15 | 1498  | 细石英颗粒 | N-31  | 10.1±0.8   |
| TJC-1-24 | 2378  | 细石英颗粒 | N-32  | 85±8 *     |
| TJC-1-25 | 2447  | 细石英颗粒 | N-33  | 84±8 *     |
| TJC-1-27 | 2614  | 细石英颗粒 | N-34  | 83±8 *     |
| TJC-1-29 | 2823  | 细石英颗粒 | N-35  | 84±8 *     |
| TJC-1-36 | 3404  | 细石英颗粒 | N-36  | 94±10 *    |
| TJC-1-41 | 3810  | 细石英颗粒 | N-37  | 88±8       |
| TJC-1-45 | 4150  | 细石英颗粒 | N-38  | 92±8       |
| TJC-1-50 | 4664  | 细石英颗粒 | N-39  | 96±12      |
| TJC-1-54 | 5066  | 细石英颗粒 | N-40  | 104±11     |
| TJC-1-60 | 5632  | 细石英颗粒 | N-41  | > 119±12   |

注: \* 测年数据仅供参考。

理灰黑色黏土—泥炭层,下部为灰褐色细中砂,前者同样是水位相对偏低时期的沉积。49.97 ~ 49.99m 泥炭<sup>14</sup>C 测年为>43500aBP,已经无法用于进一步的讨论;50.66m 的 OSL 测年结果为(104.0 ±11.0)ka 只能解释研究钻孔大致属于 MIS 5 期以来的地层。

综上所述可知,结合沉积物岩性和埋藏古生物特征,去除误差较大且不合逻辑的 3 个 AMS<sup>14</sup>C 和 7 个 OSL 测年数据,可见 TJC-1-1 孔地层为 MIS 5 阶段约 13 万年以来较为连续的沉积。

3.2 孢粉分析

孢粉鉴定结果显示孢粉种类丰富,以木本和草本植物花粉为主,不同层位二者的含量此消彼长,而蕨藻类孢子总体显示含量较低,且不同沉积单元蕨类含量变化较大。木本中主要组分包括针叶树种松属(*Pinus*)和云杉属/冷杉属(*Picea/Abies*),阔叶树种桦属(*Betula*)、榆属(*Ulmus*)、胡桃属(*Juglans*)、椴树属(*Tilia*)、落叶栎属(*Quercus*)、枫香属(*Liquidambar*)、鹅耳枥属(*Carpinus*)、桑科(*Moraceae*)及灌木榛属(*Corylus*)、大戟科(*Euphorbiaceae*)、木犀科(*Oleaceae*)、沙棘属(*Hippophae*)、蔷薇科(*Rosaceae*)、麻黄属(*Ephedra*)、白刺属(*Nitraria*)等。草本植物花粉主要有盐生草本藜科(*Chenopodiaceae*)和蒿属(*Artemisia*),中生旱生草本禾本科(*Gramineae*)、菊科(*Compositae*)、紫菀属(*Aster*)、蒲公英属(*Taraxacum*)、毛茛科(*Ranunculaceae*)、蓼属(*Polygonum*)、百合科(*Liliaceae*)、荨麻科(*Urticaceae*)、葎草属(*Humulus*)、唇形科(*Labiatae*)、石竹科(*Caryophyllaceae*)及水生湿生草本狐尾藻属(*Myriophyllum*)、莎草科(*Cyperaceae*)、荇菜属(*Nymphoides*)、香蒲属(*Typha*)等。水生蕨类含

量较低,主要包括卷柏属(*Selaginella*)、中华卷柏(*S. sinensis*)、膜蕨属(*Hymenophyllum*)、铁线蕨属(*Adiantum*)、凤尾蕨属(*Pteris*)、水龙骨科(*Polypodiaceae*)、里白属(*Hicriopteris*)、蹄盖蕨属(*Athyrium*)和未定义种属的单缝孢(*Monolete spores*)。个别层位还出现了少量的藻类,如环纹藻(*Concentricystis*)、双星藻(*Zygnema*)、舌藻属(*Lingulodinium*)、口盖藻(*Operocarpum*)、刺甲藻(*Spiniferitaceae*)、刺球藻(*Baltisphaeridium*)、石地钱(*Reboulia*)等。

由于孢粉由陆地搬运至海区沉积经历了不同程度的分选,钻孔 TJC-1-1 地层中主导孢粉类型相对集中。木本属种中主要有松属、栎属、桦木属、榆属、胡桃属和椴属等,而草本植物以盐生的蒿属、藜科、禾本科和菊科为主。蕨类组分相对丰富,以水龙骨、里白属、卷柏属、凤尾蕨和铁线蕨为主,而藻类含量低且仅在个别层位出现。根据地层岩性及不同属(科)孢粉的含量变化,参照 CONISS 聚类分析结果,整个剖面孢粉百分含量图谱可划分为 5 个孢粉带和 7 个孢粉亚带(图 3),为方便后续整个钻孔数据的延续性分析,各带的孢粉组合特征按由新到老的顺序描述如下:

带 I (0~15.63m) 松属-落叶栎-蒿属-藜科-禾本科组合

此带孢粉类型丰富,种类变化小,但孢粉浓度相差悬殊,下部(2.03~15.63m)浓度很低,约 19 粒/g,而顶部 2.03m 以浅沉积孢粉浓度约为 314 粒/g。孢粉的主导类型类似,木本以松属、落叶栎、榆属、桦属等为主,草本以蒿、藜和禾本科为主,向上出现了较高含量的湿生草本莎草科和香蒲属。

带 I 1 (0~2.03m) 松属-落叶栎-藜科-莎草科组合

此阶段孢粉统计数均高于 400 粒,孢粉浓度较高,约 314 粒/g。孢粉组合中木本组分略占优势,以松属和落叶栎属为主,二者含量分别为 29.6% 和 16.1%,其他阔叶树种如榆属、桦属和鹅耳枥属也有一定含量。草本含量次于木本,约为 39.4%,以盐生藜科(12.7%)、蒿属(9.0%),及中旱生禾本科(7.4%)和菊科(0.8%)为主,湿生草本如莎草科(4.8%)和香蒲属(2.0%)也占一定比例。蕨类以中华卷柏和水龙骨为主,而藻类中出现了一定含量的舌藻、口盖藻和刺甲藻。

带 I 2 (2.03~15.63m) 蒿属-藜科-禾本科-落叶栎组合

此阶段孢粉统计数约 100 粒(27~407 粒),其

中 15 个样品的孢粉统计数少于 60 粒,尤其是 7.84m 以深样品孢粉浓度偏低,但整体来看孢粉种类相对丰富。孢粉组合中草本含量略高于木本,平均含量约为 48.1%,主要组分有蒿属(17.8%)、藜科(12.8%)、禾本科(9.1%)和菊科(1.2%)等;同时此亚带下部还出现了零星的湿生草本如莎草科和香蒲属,向上部显著增加。木本组分中针叶树种松属为主导,含量约为 20.7%;其他阔叶树种种类相对丰富但含量较低,主要阔叶组分落叶栎(8.1%)、榆属(4.2%)、桦属(1.8%)和胡桃属(0.6%)占一定比例,并伴有少量丰富的灌木如蔷薇科、桑科、榛木属、木樨科、杜鹃花科和麻黄属等。蕨类含量较低,平均约为 7.6%,主要包括以卷柏属、凤尾蕨属为主的三缝孢和以水龙骨和蹄盖蕨为主的单缝孢。

带 II (15.63~17.66m) 此带有 4 个孢粉样品,其中上部两个样品统计量小于 60 粒,下部两个样品(16.96 和 17.66m)孢粉组成差别较大。16.96m 处样品孢粉组分主要表现为草本和蕨类的高含量,其中草本主要以藜科(18%)、蒿属(14.1%)、禾本科(7.3%)和菊科(2%)为主;蕨类组分中以凤尾蕨属、里白属和蹄盖蕨为主。木本以松属(18.5%)和落叶栎属(7.3%)为主,其他阔叶组分如桦木属、榆属和胡桃属也占一定比例。17.66m 处样品孢粉组分中,木本急剧上升成为绝对主导,平均含量约为 61.4%;尤其是阔叶组分中落叶栎属的含量可达 26.1%,出现了喜暖常绿阔叶树种青冈栎属和桑科,其他阔叶组分如桦木属、榆属及胡桃属也显著增加;草本含量低,主导组分有蒿属、藜科和禾本科。蕨类含量略有下降,但主导组分变化不大。

带 III (17.66~27.08 m) 落叶栎-松属-胡桃属-榆属-水龙骨组合

此带孢粉浓度达剖面峰值 551 粒/g,孢粉组合特征较带 I 和带 II 变化较大,表现为阔叶树种和蕨类的繁盛。阔叶树种落叶栎属(21.6%)、胡桃属(5.7%)、榆属(4.1%)、桦属(2.0%)的含量均达到剖面最大值,持续出现暖温带树种枫香属(0.7%),并伴随灌木蔷薇科和麻黄属的显著增加;而针叶组分虽仍以松属(11.6%)和冷杉/云杉属(1.7%)为主,但含量较之前明显降低。草本组分含量平均约为 25%,主要组分如藜科(6.6%)、蒿属(1.4%)、禾本科(2.6%)、菊科(1.4%)和蒲公英属(0.9%)的含量几乎均降低至剖面最小值。蕨类组分含量大幅增至剖面最大值,含量约为 16.9%,主要以水龙骨科(7.2%)、蹄盖蕨(4.0%)和里白属(1.6%)等单缝孢为主。此外,藻类中出现了一定含量的环纹藻,底部

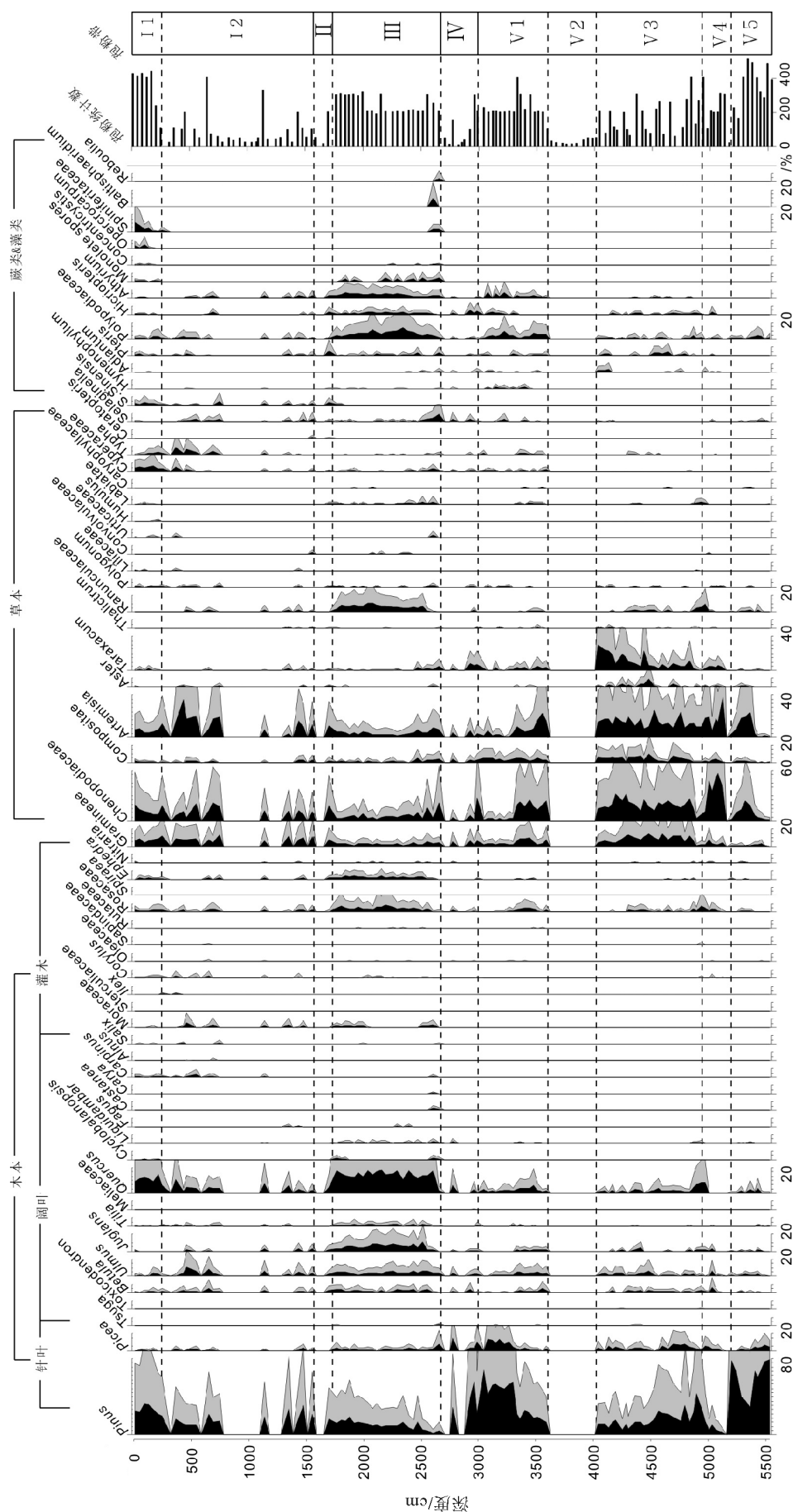


图3 渤海TJC-1孔孢粉百分比图(图内仅包括主要的孢粉类别,灰色部分表示各孢粉类别均放大3倍)

Fig. 3 Pollen percentage diagram of TJC-1 Core from the Bohai Sea (only major taxa are shown, all taxa percentages were exaggerated by 3 times)

偶见海生的刺甲藻和刺球藻。

带Ⅳ(27.08~30.03m)松属-藜科-禾本科

此带共8个孢粉样品,其中4个样品的统计数低于60粒。整体而言,孢粉浓度偏低,上部6个样品的孢粉浓度极低(1~15粒/g),向下明显增高。上部样品的孢粉组合木本占绝对主导,平均量约64.6%,主要包括针叶树种松属(46.6%)和冷杉/云杉属(7.0%),阔叶树种中栎属(4.7%)、榆属(2.8%)、桦属(1.9%)和胡桃属(0.9%)也占一定比例。草本含量较低,以蒲公英属(5.3%)、禾本科(5.0%)、蒿属(4.7%)、藜科(4.6%)和菊科(5.7%)为主,其中藜科和蒿属的波动较大,在此段中间层位二者含量快速下降,对应松属含量的高值。蕨类植物含量约为8.2%,以三缝孢如卷柏属和里白属为主。此外,底部29.9m处一个样品孢粉组分以藜科为主的草本占主导,藜科花粉可达27.6%,其他草本则为禾本科、蒿属、菊科和蒲公英属等。木本组分主要包括松属、喜凉爽环境的云杉属和喜暖的榆属,蕨类以里白属等三缝孢为主。

带Ⅴ(30.03~55.34m; MIS 5)松属-藜科-蒿属-蒲公英属组合

此带孢粉浓度(1~874粒/g)和孢粉组合特征变化明显且变幅较大。整体来看,木本植物的含量在此阶段表现为向上先减少后增加,其中亚带Ⅴ1和Ⅴ5以木本为主导,以针叶组分松属为主,冷杉/云杉属也占一定比例;阔叶组分以落叶栎、榆属、桦属为主,灌木中蔷薇科含量较高。草本植物向上呈现减少趋势,主要在亚带Ⅴ3占优势,其中藜科、蒿属、禾本科、蒲公英属和菊科含量较高。蕨类植物以水龙骨科为主,向上出现了少量的里白和蹄盖蕨。藻类含量几乎为零。

由于此阶段孢粉组合特征变化明显,可细分为5个亚带。

亚带Ⅴ1(30.03~36.00xm)松属-藜科-蒿属-水龙骨科-栎属组合:孢粉浓度高,以木本植物尤其是针叶树种的繁盛为主要特征,木本平均含量约为56.9%。其中以针叶松属(40.9%)为主导,其他树种如冷杉/云杉属(5.3%)、落叶栎属(3.5%)、榆属(2.7%)、胡桃属(0.9%)和椴属(0.2%)的比例也略有增加。草本明显减少,平均值为33.5%,仍以藜科(11.7%)、蒿属(8.3%)、禾本科(4.4%)、菊科(3.8%)和蒲公英属(2.6%)等为主。蕨类植物含量相对较高,以水龙骨科为主,蹄盖蕨和里白属也占一定比例。

亚带Ⅴ2(36.00~40.52m)孢粉统计数均低于

60粒,平均每样统计到33粒,孢粉浓度极低。统计到的孢粉组成中,草本植物占绝对优势,以蒿属、藜科、蒲公英属和禾本科为主;木本中以松属和冷杉/云杉属为主,并伴有零星的桦属、榆属和灌木柳属。蕨类几乎消失。

亚带Ⅴ3(40.52~49.50m)松属-藜科-蒿属-蒲公英属-栎属:孢粉浓度较低,孢粉类型相对丰富。孢粉组合仍以草本植物为主,含量略有下降,约为63.5%,其中主要包括藜科(18.9%)、蒿属(18.2%)、蒲公英属(9.3%)、禾本科(8.4%)和菊科(4.1%)。木本植物以松属(19.3%)为主,落叶栎属(3.8%)突然出现且含量较高,还伴有零星的亚热带树种枫香属;此外,落叶阔叶树种桦木属和榆属也占一定比例。蕨类种类增多,除了单缝孢水龙骨科之外,还出现了一定含量的三缝孢如凤尾蕨、铁线蕨和里白属。

亚带Ⅴ4(49.50~51.37m)藜科-蒿属带:孢粉统计数整体较高,孢粉浓度也偏高,其中51.64m处样品孢粉统计数仅为24粒。孢粉组合以草本植物的繁盛为主要特征,平均含量约为81.8%。草本花粉中以盐生藜科(46%)和蒿属(23.7%)为主,还有少量的禾本科(3.8%)、蒲公英属(4.5%)和菊科(2.1%)花粉。木本植物种类较单一,以松属为主,含量仅为6.3%,还有少量的冷杉/云杉属(2.4%)、桦属(1.7%)和榆属(1.8%)。蕨类中见极少量的水龙骨科单缝孢。

亚带Ⅴ5(51.37~55.34m)松属-藜科-蒿属:孢粉浓度较高,孢粉组合中木本植物占绝对主导,含量在41.8%~97.1%之间变化,均值约为75%。其中以松属为主,约为67.8%,同时伴有少量的云杉属(2.7%)、栎属(1.7%)和榆属(1.2%)等。草本植物含量较低,平均值为22.4%,以蒿属(10%)和藜科(8.8%)花粉为主。蕨类中出现了少量的水龙骨科单缝孢。

## 4 讨论

### 4.1 TJC-1-1孔晚更新世以来的地层划分

TJC-1-1孔位于渤东凹陷,其详细的沉积物岩性、沉积构造、年代学及古生物组合特征表明,该孔保存了晚更新世 MIS 5 期以来相对连续的沉积,海平面经历了若干次波动,沉积环境变化显著,晚更新世 MIS 5 期以来发育了3次规模较大的海侵,分别对应3组海侵层,与渤海西岸的已有晚更新世三期

海侵的认识<sup>[23,24,26,27]</sup>一致。

全新世阶段,依据渤海湾北部 31 个钻孔岩心地层和微体生物分析,研究区在全新世海侵之前发育河流和河谷平原,而当时的古河道系统南堡水系和岐口水系(古黄河)距 TJC-1-1 孔仅几十千米,且 TJC-1-1 孔位于当时的凹槽浅谷区域<sup>[28]</sup>。TJC-1-1 孔 15.60m 处出现泥炭层,作为海侵基底标志层的泥炭沉积,在渤海湾及其沿岸地区钻孔中普遍出现在早全新世,表明渤海湾地区海侵发生前分布大面积的湖沼沉积<sup>[22,28]</sup>,之后海平面随着气温的增加开始逐渐上升,在早全新世(约 9605cal. aBP)海岸线已经到达钻孔位置附近;14.30~14.45m 贝壳富集是全新世海侵发生初期、海洋动力增强的标志<sup>[23]</sup>。由于 TJC-1-1 孔距离河口距离近且位于凹槽区,早全新世海面上升初期河流与海面相向移动,大量河流物质快速堆积在海域近岸(钻孔位置处),推测 DU1a(15.60~2.03m)为河口附近堆积的三角洲前缘沙坝沉积<sup>[29]</sup>,依据其岩性特征进而推断属于钻孔北侧临近的水下滦河三角洲沉积。全新世中期,海面在 7.0~6.5kaBP 达到最大范围,海岸线已到达现渤海岸上一段距离<sup>[29-31]</sup>,此时 TJC-1-1 孔处于浅海低能环境,5~6ka 期间保存了约 2 m 厚的中全新世沉积,因此 TJC-1-1 孔这一阶段为快速堆积-沉积时期,由于海流作用缺失 5kaBP 以来的地层。基于同海域不同区块的离岸距离及物源供应差别显著,渤海湾全新世海侵体系域中,多数钻孔保存的海侵沉积厚度在 5~20m 之间<sup>[22,24,26-28,32-34]</sup>,TJC-1-1 孔全新世阶段处于滨岸水下三角洲和浅海环境中,沉积了较厚的 MIS 1 期海相地层。

MIS 2 阶段,渤海陆架出露,整体处于剥蚀状态,属于低位体系域,形成陆相(河流)沉积<sup>[22]</sup>。依据下伏 DU3 单元顶部有孔虫壳体测年,可判断该单元属于 LGM(=Last Glacial Maximum,末次盛冰期)地层,且由于当时的寒冷—寒凉气候下物质来源较少,故该单元整体厚度不大。TJC-1-1 孔此时段以黄褐色中细砂为主,但几乎无海相微体生物埋藏,表明此时可能属于水动力环境较强的河流相或河口相沉积。TJC-1-1 孔与其附近 BH08 孔记录<sup>[25]</sup>一致,均显示 MIS 2 阶段盛冰期沉积存在<sup>[24]</sup>。

MIS 3 阶段属于末次冰期亚间冰阶,尤其是 40~30ka 期间,众多记录表明此时段气候湿润,海面较高<sup>[35]</sup>。渤海西部近岸多数钻孔记录中(BQ1, BQ2, BZ1, BZ2)缺失该阶段沉积<sup>[26,32-34]</sup>,而海区部分钻孔(BH08, HB1)包括 TJC-1-1 孔保存了不同厚度的 MIS 3 海侵层<sup>[24,27]</sup>,一定程度上表明此阶段海

侵程度较全新世弱。TJC-1-1 孔 DU3 沉积单元底部的泥炭薄层与 MIS 1 海侵层基底泥炭标志层类似,标志着 MIS 3 期海侵的开始,而此段底部 25.86~27.03m 的黄褐色细粉砂应该属于水流进积入海的河流相沉积;随着气候趋暖湿,海面稳定上升,在低能环境中保存了 17.66~25.86m 之间的浅海相沉积,即为 MIS 3 阶段海侵层。

MIS 4 阶段对应 DU4 沉积单元的中细砂,自上而下颜色从黄棕色到黄褐色、灰褐色,底部出现贝壳层及细小砾石,埋藏微体生物浓度很低,仅在底部稍有增加,此时段应该属于海陆交互相沉积,为河流—滨岸(潮坪)环境。

MIS 5 阶段,尤其是 MIS 5 早期,海侵程度较大,保存了以浅海相为主的高位体系域<sup>[23]</sup>。在 90~85kaBP 海平面发生波动,为末次间冰期海侵,气温较现代渤海地区气温高,气候偏暖。在本钻孔中表现为 MIS 5a、MIS 5c 和 MIS 5e 气候偏暖,海平面较高,属于海相沉积,这与 BH08 钻孔的发现<sup>[25]</sup>一致;MIS 5b、MIS 5d 和 MIS 4 阶段属于海退体系域,海平面降低,出现海陆交互相或河流相沉积。

总之,TJC-1-1 孔精细的年代框架下,沉积相、古生物群等指标揭示出 MIS 5 阶段以来研究区保存了完整的沉积序列,沉积环境变化显著。MIS 1、MIS 3 和 MIS 5 阶段相对高海面时期分别保存了三次大的海侵沉积,MIS 2 和 MIS 4 阶段为河流相等陆地沉积。

## 4.2 孢粉组合特征与环境变化

渤海海区及周边的孢粉学研究表明,晚更新世以来渤海近岸区域植被变化显著,主导组分随气候变化呈现周期性变化,但核心组分变化不大,与渤海海域表层沉积现代孢粉组合相一致<sup>[8-11,36-38]</sup>。TJC-1-1 孔沉积物的孢粉组分中木本植物以松属和落叶栎为主,与现代渤海近岸山地分布有以赤松、麻栎、油松、辽东栎和槲树为主的针阔叶混交林,或阔叶落叶林植被分布特征一致;该孔草本花粉以藜科和蒿属为主,与渤海近岸大面积分布以藜和蒿为主的盐碱滩地密切相关,从而印证了前述总结。

即使如此,海洋沉积物孢粉组合特征很大程度上还受到不同孢粉类别传播方式差异的影响。渤海沉积的孢粉主要通过沿岸河流搬运和空气传播而来,草本花粉由于不善“飞翔”,多数飘落于原生植被附近,较近距离迁移或随河流入海沉积在渤海较浅海域,因而渤海近岸地带藜科和蒿属草本花粉含量较高<sup>[36-39]</sup>;而木本花粉由于植被植株较高,多数分布

于山地或丘陵地区,其传播入海是风力和水流共同作用的结果,因此木本花粉含量较高值分布水域较草本远,呈现含量向海略有增加的趋势<sup>[37,39]</sup>;尤其是松属花粉,不但产量很高,且其花粉具有大气囊,有利于随气流远距离传播,进入水流后也会搬运一定距离,因而松属花粉的高值区多分布在较深海区<sup>[40]</sup>。由前人上述总结可知,木本花粉和草本花粉的比值的变化在一定程度上代表了海平面的波动情况。此外,气候变化会同步导致陆区植被及海平面变化,也会间接影响海洋沉积中孢粉组合的特征。

TJC-1-1 孔沉积序列中孢粉组合特征变化显著,加之木本和草本含量此消彼长的旋回性变化,显示了植被-气候-海平面变化的综合作用。

#### 4.3 古气候古环境变化

本文利用较精确的测年数据,建立了 TJC-1-1 钻孔较细致的地层年代框架;继而可以在前人研究的基础之上,结合深海氧同位素阶段划分,以较高分辨率的孢粉研究揭示区域植被演替、气候及海平面变化过程(图 4)。

孢粉带 V(55.34 ~ 30.03m)对应 MIS 5 阶段,沉积物岩性及孢粉组合特征波动较大。MIS 5e(亚带 V5)沉积物以粉砂质黏土为主,普遍出现贝壳碎片,其中 51.37~51.50m 段为灰黑色黏土贝壳层,孢粉浓度很高,木本/草本花粉比值出现全剖面高峰

值;其中松属含量达 67.8%,并伴有少量的落叶栎;草本以盐生藜科和蒿属为主,含量较低,指示了此阶段沿岸山地植被生长着针阔叶混交林,滨岸有盐沼植被发育,气候温暖湿润,海区沉积环境较稳定,属于较高海平面的滨海环境。MIS 5d(亚带 V4)以灰褐色细-中砂沉积为主,上部出现砂泥互层,岩性较均一,孢粉浓度相对较高,木本/草本花粉比值极低,以近岸潮滩盐生的藜科和蒿属花粉为主,木本和蕨类孢子含量较低,表明此阶段气候相对寒冷干燥,沿岸山地植被恶化,近岸发育草甸草地植被,属沉积动力较强的滨岸环境。MIS 5c(亚带 V3)为灰褐色细砂-中砂,脉状层理发育,见虫孔和贝壳碎片,孢粉浓度较低,木本/草本花粉比值也较低,虽然仍以草本为主,但木本花粉含量有所增加,尤其是喜暖的阔叶树种落叶栎属最为明显,同时蕨类种类变得丰富,说明此阶段气候温暖湿润,陆地发育针阔叶混交林草地,海平面相对较亚带 I 2 高。MIS 5b(亚带 V2)为黄棕色砂质沉积,底部发育泥炭层,主要以水动力强的河流沉积为主;孢粉浓度很低,木本/草本比值极低,其中草本占绝对主导,早生草本蒲公英属和禾本科增幅显著,而木本中以针叶松属和冷杉/云杉属为主,指示气候干冷,沿岸发育草甸草地,海退停滞时间发育泥炭沉积(也可视为 MIS 5a 海侵的基底泥炭层)。MIS 5a(亚带 V1)为灰黑色黏土,水平层理发育,出现大量贝壳碎片及贝壳碎片层,孢粉浓度很

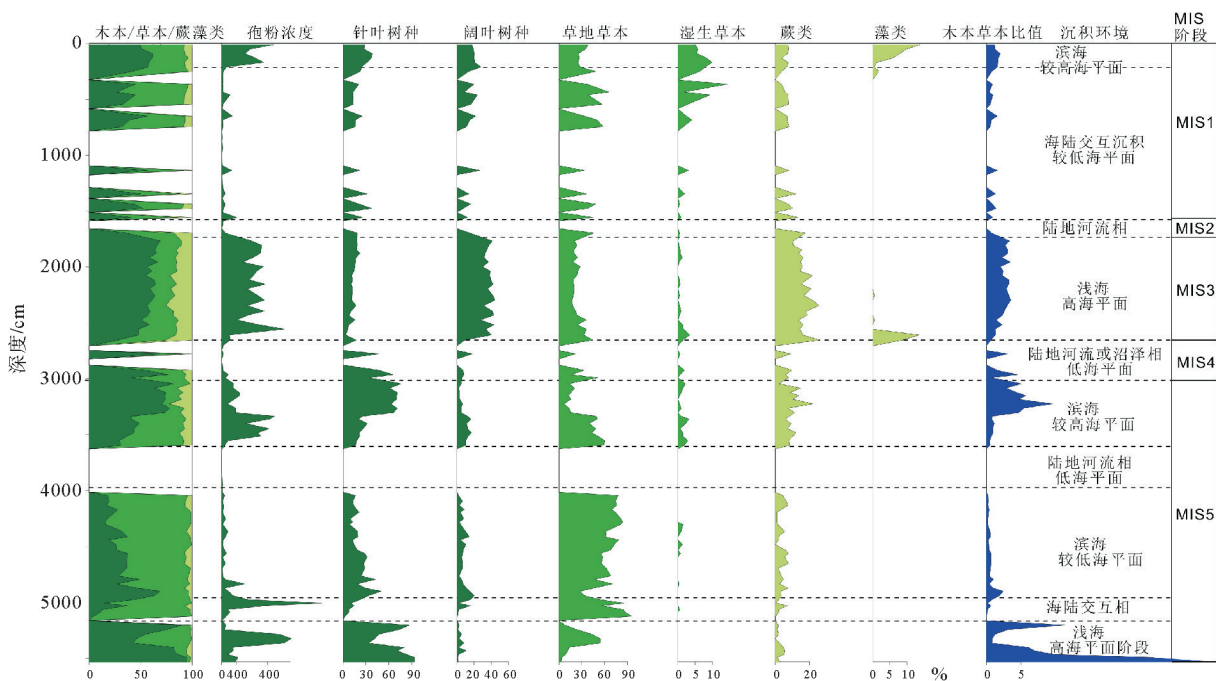


图 4 TJC-1 钻孔孢粉浓度、孢粉组百分含量及木本草本比值变化综合分析图

Fig.4 Integrated column of pollen concentration, percentages and ratio of trees and herbs

高,木本/草本比值迅速上升,木本取代草本成为主导,主要包括针叶松属和阔叶组分落叶栎属、榆属等;同时,喜阴湿易于被水流搬运的孢子含量也明显增加;草本含量较低,仍以盐生的藜科和蒿属花粉为主,说明此阶段气候温暖湿润,山地发育针阔叶混交林,沿岸分布有草甸草地植被,沉积环境稳定,属于高海平面的浅海。

渤海中部 Bc-1 孔的孢粉记录也显示 MIS 5 阶段早期和晚期气候温暖湿润,陆源区发育针阔叶混交林-滨岸草原植被;而 MIS 5 中期气候干冷条件下发育森林草原,研究区处于海陆交互带,其中 MIS 5c 气候相对湿润,此时段河流堆积作用大于海侵作用,以河流相沉积为主<sup>[8, 41]</sup>。

孢粉带 IV (30.03 ~ 27.08m) 对应 MIS 4 阶段,沉积物以黄棕色-黄褐色细-中砂为主,此段顶部 27.03~27.08m 处为泥炭层,而下部出现细小砾石层,向下继续出现贝壳层。孢粉浓度很低,孢粉统计数偏低,此段仅有两个样品的统计数超过 100 粒,二者孢粉组合中以针叶树种为主导,草本含量较低;其他样品均以盐生藜科和蒿属等草本花粉为主,表明此时段沉积环境变化较大,气候温凉湿润或干冷,发育森林草地,属于陆地沉积动力较强的河流相或沉积动力较弱沼泽相环境。研究区其他钻孔(渤海 12-1,渤海 12-2, Bc-1 和 Zk228)地层的孢粉记录均显示此阶段山地针叶树种扩张,尤其是耐寒的冷杉和云杉属含量较高,近岸盐生草地发育,气候干冷<sup>[8-11]</sup>。由此可见, MIS 4 时段气候整体偏冷,渤海周边发育森林草地植被,海平面下降明显,沉积环境变化较大。

孢粉带 III (27.08 ~ 17.66m) 对应 MIS 3 阶段,岩性总体上为灰黑色黏土,水平层理发育,孢粉浓度达全剖面高峰值,木本/草本比值高。孢粉组合中主要表现为木本组成中阔叶组分取代针叶树种为主,阔叶树种落叶栎属、胡桃属、榆属和桦属的含量均达到全钻孔剖面最大值,同时持续出现暖温带树种枫香属(0.7%),灌木树种蔷薇科和麻黄属也显著增加;而针叶组分松属和冷杉/云杉属的含量较之前明显降低。蕨类以水龙骨和蹄盖蕨等单缝孢为主,其含量增至剖面峰值;藻类中出现了一定含量的环纹藻,底部偶见海生的刺甲藻和刺球藻。然而草本含量很低,藜科、蒿属、禾本科、菊科和蒲公英属的含量几乎均降低至剖面最小值。因此可推测此时段气候条件温热湿润,沿岸发育落叶阔叶混交林,属于高海平面的滨岸浅海环境。周边其他孢粉记录中也显示此时段阔叶树种含量较高或占主导,草本中藜、蒿和

香蒲属的含量也在不同位置的钻孔中呈现出高值,表明此阶段气候条件适宜,阔叶树种扩张,沿岸洼地湖泊众多,滩地盐生植被发育<sup>[8,9]</sup>。松含量在 Zk228 和渤海 12-2 钻孔沉积中的含量很高,可能近岸山地高海拔仍有松林分布,同时也与松属花粉的超代表性有关。因此, MIS 3 阶段气候温暖湿润,陆区山地发育阔叶落叶林,高海拔山地分布有针叶林,近岸洼地湖泊及滩地盐生湿地广布,属于高海平面滨岸浅海环境。钻孔所见的孢粉是植被-气候-海平面变化共同作用的结果,该孔 MIS 3 阶段所见阔叶树种含量很高,甚至超过 MIS 5 阶段,并不代表此时气候比 MIS 5 阶段温度更高湿度更大,这是由于阔叶树种和草本花粉在海区的传播距离一般小于松属花粉,距岸越近、草本和阔叶树种组分含量越相对较高,而针叶树种组分在较深海域含量较高<sup>[40]</sup>,这一现象在一定程度上可以解释 MIS 5 阶段温暖湿润气候条件下松属花粉的含量高于 MIS 3 阶段。

MIS 2 阶段对应带 II (17.66 ~ 15.63m), 此阶段渤海陆架出露,整体处于剥蚀状态,属于低位体系域,形成陆相(河流)沉积<sup>[22]</sup>。孢粉在此阶段仅有 4 个样品,孢粉统计数上部两个样品不足 60 粒,下部 16.96m 处样品孢粉组分主要表现为草本和蕨类的高含量,这可能与当时的寒冷—寒凉气候条件有关;此段沉积岩心以黄褐色中细砂为主,但微体生物标本少,也可能与当时较强的水动力环境相关,因而此时可能对应 MIS 2 阶段冰盛期,气候寒冷,近岸发育草原植被,但本文以为尚需更多证据来支持这一认识。

MIS 1 阶段对应带 I (15.63 ~ 0m), 此时段岩性以黄褐色细砂-粉砂为主,出现灰褐色-灰黑色黏土薄层,底界为泥炭层。其中亚带 I 2 孢粉浓度低,木本/草本比例也较低。孢粉种类较丰富。孢粉组合以草本为主,其中蒿属含量最高,其他主要组分还有藜科、禾本科和菊科等,并出现了少量的湿生草本如莎草科和香蒲属。木本组分中针叶树种为主导,主要阔叶组分包括落叶栎、榆属,桦属和胡桃属也占一定比例,并共生有少量丰富的灌木。蕨类主要包括以卷柏属、凤尾蕨属为主的三缝孢和以水龙骨和蹄盖蕨为主的单缝孢。可见此阶段气候温凉湿润,山地发育针阔叶混交林,近岸发育草地或湿地植被。渤海西部 12-1、12-2 孔及滦河三角洲乐五井的孢粉记录中显示木本占主导,且栎属花粉高于松属,然而本文 TJC-1-1 钻孔、渤海中部及南部钻孔的孢粉记录中松属花粉高于栎属花粉,推测这种现象与不同类型孢粉传播特点相关<sup>[9,10,12]</sup>。渤海南部及泥质区

的孢粉记录中此阶段孢粉组合特征与本钻孔基本一致,均表明此阶段渤海区域气候温凉湿润,山地发育阔叶落叶、针叶混交林,滨岸洼地湖泊广布<sup>[5]</sup>。

结合沉积钻孔岩性特征可见,层段(带Ⅱ)下部沉积以黄褐色细砂粉砂为主,由底部贝壳-泥质脉状体向上变为细砂-粉砂,再过渡到泥炭层,且沉积物中几乎没有有孔虫,表明此层段可能为河控三角洲或河口沉积;继续向上则出现另一个沉积旋回(带Ⅰ2),沉积物以灰褐色粉砂为主,水平层理发育,见生物扰动及贝壳碎片,同时有孔虫的间断出现指示此层段可能为前三三角洲相。此外,泥炭层作为海区判定气候和海平面变化信息的重要标志,主要形成于盐沼滞水环境。此层段底部泥炭层的出现,一定程度上表明研究区早全新世气候温凉湿润,但海平面还未完全上升到渤海西部,印证了前人对我国东部海区海平面变化的结论<sup>[30,42]</sup>。综上可知,早全新世研究区气候温凉湿润,陆区发育针阔叶混交林,近岸湖沼植被广布,属于陆地河流相-三角洲沉积。

亚带Ⅰ1(0~2.03m)对应中全新世。此阶段沉积物上部以黄褐色黏土质粉砂为主,下部演变为粉砂质黏土。孢粉浓度高,木草比值高;孢粉组合中以松属和落叶栎属为主,并共生有榆属、桦属和鹅耳枥属等阔叶树种。草本中除了盐生草甸植被外,湿生草本莎草科和香蒲属也占一定比例。蕨类以中华卷柏和水龙骨为主,而藻类中出现了一定含量的舌藻、口盖藻和刺甲藻。其他钻孔的研究也同样揭示出中全新世阶段木本变得多样化,盐生草本和湿生草本含量较高,海生藻类普遍出现<sup>[5-11]</sup>。同时,此阶段的孢粉组合特征与渤海区现代沉积物类似<sup>[24,28-30]</sup>,推测气候条件与当今类似,为温暖湿润,周边山地生长针阔叶混交林,近岸洼地分布湖泊沼泽植被,潮滩生长盐生草地,属于滨海或浅海沉积环境。

## 5 结论

(1) MIS 5 阶段沉积物岩性及孢粉组合波动频繁。早期沉积物以粉砂质黏土为主,孢粉组合中松属和草本含量高,针阔叶混交林-滨岸草地发育,属于气候较暖的较高海平面阶段;中期气候整体上趋于转冷(凉)干,草地植被扩张,海平面下降,演变为沉积动力强的滨海近岸沉积或陆相沉积; MIS 5 晚期,气候回暖,木本植被扩张,海平面大幅上升,渤海处于沉积动力较弱的滨岸浅海相。

(2) MIS 4 阶段沉积物以黄棕色-黄褐色细-中砂为主,孢粉中以针叶、草本藜禾本科为主,气候

寒冷干燥,陆区发育针叶林草地,海平面显著下降,主要属于河流或湖沼相沉积。

(3) MIS 3 阶段沉积物以灰黑色黏土为主,孢粉组合中以阔叶落叶树种为主,蕨类含量达剖面峰值,藻类频现,而针叶树种和草本含量很低,指示了此阶段气候温暖湿润,阔叶落叶混交林发育,属于高海平面的滨岸浅海相。

(4) MIS 2 阶段沉积物以黄褐色中-细砂为主,推测为末次冰盛期沉积,孢粉稀少,或以草本为主,推测寒冷气候条件下陆区发育草原或荒漠草原植被,属于河流相沉积。

(5) 该孔 MIS 1 阶段包含早全新世和中全新世地层,缺失晚全新世沉积。早全新世针阔叶混交林-滨岸草地发育,属于海平面较低的河流水下三角洲相。中全新世气候环境条件与现代类似,周边陆地发育针阔叶混交林,近岸洼地分布湖泊沼泽植被,潮滩生长盐生草地,属于滨海相沉积。

**致谢:**衷心感谢天津地质调查中心王强研究员在年代地层分析过程中给予的指导和帮助,感谢参与外业钻探施工及室内分样人员。

## 参考文献 (References)

- [1] 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985. [Institute of marine geology, Institute of Oceanography, Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences. Geology of Bohai Sea[M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [2] 罗运利, 孙湘君. 3.15~0.67 Ma 时段南海北部深海沉积物孢粉记录的植被演化及其对全球变化的响应[J]. 科学通报, 2012, 57(30): 2882-2891. [LUO Yunli, SUN Xianjun. Vegetation evolution and its response to the global changes during the 3.15~0.67 Ma period inferred from pollen record in the north of South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(30): 2882-2891.]
- [3] Xu D K, Lv H Y, Wu N Q, et al. Asynchronous marine-terrestrial signals of the last deglacial warming in East Asia associated with low-and high-latitude climate changes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(24): 9657-9662.
- [4] 苟淑茗. 渤海中部晚更新世末期以来孢粉组合及全新世下限问题[J]. 海洋科学, 1979(4): 26-31. [GOU Shuming. Spore-pollen assemblages of sediments from the central Bohai Sea since the late Pleistocene and the lower limit of Holocene[J]. Journal of Marine Sciences, 1979(4): 26-31.]
- [5] 陈金霞, 石学法, 乔淑卿. 渤海地区全新世孢粉序列及古环境演化[J]. 海洋学报, 2012, 3(3): 99-105. [CHEN Jinxia, SHI Xuefa, QIAO Shuqing. Holocene palynological sequences and

- palaeoenvironmental changes in the Bohai Sea area[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 3(3): 99-105.]
- [6] 孙延智, 李波. 渤海西部近岸全新世孢粉组合及古气候、古植被的演变[J]. *海洋科学通报*, 1992, 11(1): 32-40. [SUN Yanzhi, LI Bo. Palynological assemblages and evolution of palaeoclimate and palaeovegetation in Holocene in inshore area of western Bohai Sea[J]. *Marine Science Bulletin*, 1992, 11(1): 32-40.]
- [7] 王艳. 渤海湾曹妃甸晚更新世末期以来古植被与古气候演变序列[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(2): 87-92. [WANG Yan. Evolution sequences of palaeovegetation & palaeoclimate in the Caofeidian area since the late stage of the late Pleistocene[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2000, 20(2): 87-92.]
- [8] 孟广兰, 王少青. 渤海 Bc-1 孔第四纪孢粉组合及其古气候[J]. *海洋与湖沼*, 1987, 18(3): 253-264. [MENG Guanglan, WANG Shaoqing. Studies on the Quaternary spore-pollen assemblage from the Bohai Sea drilling core Bc-1 and its paleoclimate[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1987, 18(3): 253-264.]
- [9] 金小凤. 渤海西部及沿岸地区晚更新世以来孢粉组合及古地层、古地理研究[J]. *海洋科学*, 1984(3): 16-24. [JIN Xiaofeng. The spore-pollen assemblages and the stratigraphy and palaeogeography in western Bohai Sea since late Pleistocene[J]. *Journal of Marine Sciences*, 1984(3): 16-24.]
- [10] 蒋辉, 王开发, 张玉兰. 渤海西部晚更新世以来的孢粉组合及其古气候、古地理[J]. *海洋湖沼通报*, 1981(4): 35-42. [JIANG Hui, WANG Kaifa, ZHANG Yulan. Spore-pollen assemblages from the western part Bohai Bay since the late Pleistocene and their paleoclimate and paleogeography[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1981(4): 35-42.]
- [11] 吕厚远. 渤海南部晚更新世以来的孢粉组合及古环境分析[J]. *渤海海洋*, 1982, 7(2): 12-26. [Lü Houyuan. The spore-pollen assemblages in the southern Bohai Sea since the late Pleistocene and its palaeoenvironmental analysis[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1982, 7(2): 12-26.]
- [12] 王开发, 金小凤. 滦河三角洲晚更新世以来沉积的孢粉组合及其地质意义[J]. *海洋通报*, 1986, 5(8): 55-62. [WANG Kaifa, JIN Xiaofeng. Palynological assemblages of the sediments from the Luan River Delta since the late Pleistocene and their geological implication[J]. *Marine Science Bulletin*, 1986, 5(8): 55-62.]
- [13] 刘恩峰, 张祖陆, 沈吉. 莱州湾南岸滨海平原晚更新世以来古环境演变的孢粉记录[J]. *古地理学报*, 2004, 6(1): 78-84. [LIU Enfeng, ZHANG Zulu, SHEN Ji. Spore-pollen records of environmental change on south coast plain of Laizhou Bay since the Late Pleistocene[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(1): 78-84.]
- [14] 赵华, 卢演铸, 张金起, 等. 天津大直沽晚第四纪沉积物红外释光测年及环境变迁年代学[J]. *地质科学*, 2002, 37(2): 174-183. [ZHAO Hua, LU Yanchou, ZHANG Jinqi, et al. IRSL dating of late Quaternary sediments and chronology of environmental changes at Dazhigu area, Tianjin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(2): 174-183.]
- [15] 李翔, 李日辉, 陈晓辉, 等. 渤海西部 TJC-1 孔磁性地层研究[J]. *第四纪研究*, 2016, 36(1): 208-215. [LI Xiang, LI Rihui, CHEN Xiaohui, et al. Quaternary magnetostratigraphy recorded in the sediments of core TJC-1 in the western Bohai Sea[J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(1): 208-215.]
- [16] 王开发. 渤海沉积孢粉藻类组合与古环境[M]. 北京: 地质出版社, 1993. [WANG Kaifa. Spore-Pollen and Algal Assemblages in the Sediments of the Bohai Sea and Palaeoenvironments[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.]
- [17] Reimer P J, Baillie, M G L, Bard E, et al. IntCal09 and Marine09 radiocarbon calibration curves, 0-50000 years cal BP[J]. *Radiocarbon*, 2009, 51(4): 1111-1150.
- [18] Nakagawa T, Brugiapaglia E, Digerfeldt G, et al. Dense-media separation as a more efficient pollen extraction method for use with organic sediment samples: comparison with the conventional method[J]. *Boreas*, 1998, 27(1): 15-24.
- [19] Grimm E C. CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares[J]. *Computers & Geosciences*, 1987, 13(1): 13-35.
- [20] 王梦媛, 郑卓, 黄康有, 等. 海南岛南部海相沉积地层的发现及其意义[J]. *热带地理*, 2016, 36(3): 399-405, 416. [WANG Mengyuan, ZHENG Zhuo, HUANG Kangyou, et al. New insight on the marine deposit in the southern Hainan Island[J]. *Tropical Geography*, 2016, 36(3): 399-405, 416.]
- [21] 王强, 李从先. 中国东部沿海平原第四系层序类型[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 39-51. [WANG Qiang, LI Congxian. The type of Quaternary sequence in the east China coastal plain[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(4): 39-51.]
- [22] Zhou L Y, Liu J, Saito Y, et al. Fluvial system development and subsequent marine transgression in Yellow River (Huanghe) delta and its adjacent sea regions during last glacial maximum to early Holocene[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 117-132.
- [23] 王强, 张玉发, 袁桂邦, 等. MIS3 阶段以来河北黄骅北部地区海侵与气候期对比[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(1): 79-95. [WANG Qiang, ZHANG Yufa, YUAN Guibang, et al. Since MIS 3 stage the correlation between transgression and climatic changes in the north Huanghua area, Hebei[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(1): 79-95.]
- [24] Yao Z Q, Shi X F, Liu Q S, et al. Paleomagnetic and astronomical dating of sediment core BH08 from the Bohai Sea, China: Implications for glacial-interglacial sedimentation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 393: 90-101.
- [25] 李小艳, 赵泉鸿, 姚政权, 等. 渤海百万年以来的海侵记录: BH08 孔有孔虫和介形类证据[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(6): 93-108. [LI Xiaoyan, ZHAO Quanhong, YAO

- Zhengquan, et al. Transgressive records of last million years in the Bohai Sea, China: Evidence from foraminifera and ostracoda of core BH08[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(6): 93-108.]
- [26] 阎玉忠, 王宏, 李凤林, 等. 渤海湾西岸 BQ1 孔揭示的沉积环境与海面波动[J]. *地质通报*, 2006, 25(3): 357-382. [YAN Yuzhong, WANG Hong, LI Fenglin, et al. Sedimentary environment and sea-level fluctuations revealed by Borehole BQ1 on the west coast of the Bohai Bay, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(3): 357-382.]
- [27] Liu J, Saito Y, Wang H, et al. 2009. Stratigraphic development during the Late Pleistocene and Holocene offshore of the Yellow River delta, Bohai Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 36(4-5): 318-331.
- [28] 胡广元, 庄振业, 印萍, 等. D219 孔和渤海湾北部晚第四纪地质环境[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(6): 16-23. [HU Guangyuan, ZHUANG Zhenye, YIN Ping, et al. The hole D219 and the late Quaternary paleogeographic environments in the northern Bohai Bay, China[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, 33(6): 16-23.]
- [29] 陈永胜, 王福, 田立柱, 等. 渤海湾西岸全新世沉积速率对河流供给的响应[J]. *地质通报*, 2014, 33(10): 1582-1590. [CHEN Yongsheng, WANG Fu, TIAN Lizhu, et al. Holocene sedimentation rates and their response to fluvial supply on the west coast of Bohai Bay[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(10): 1582-1590.]
- [30] 赵希涛, 耿秀山, 张景文. 中国东部 20000 年来的海平面变化[J]. *海洋学报*, 1979, 1(2): 269-281. [ZHAO Xitao, GENG Xiushan, ZHANG Jingwen. Sea level changes of the Eastern China during the past 20000 years[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1979, 1(2): 269-281.]
- [31] 薛春汀. 7000 年来渤海西岸、南岸海岸线变迁[J]. *地理学报*, 2009, 29(2): 217-222. [XUE Chunting. Historical changes of coastlines on the west and south coasts of Bohai sea since 7000 a B.P[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 29(2): 217-222.]
- [32] 肖国桥, 郭正堂, 陈宇坤, 等. 渤海湾西岸 BZ1 钻孔的磁性地层学研究[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(5): 909-916. [XIAO Guoqiao, GUO Zhengtang, CHEN Yukun, et al. Magnetostratigraphy of BZ1 borehole in west coast of Bohai bay, northern China[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(5): 909-916.]
- [33] 姚政权, 郭正堂, 陈宇坤, 等. 渤海湾海陆交互沉积的磁性地层学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(1): 9-15. [YAO Zhengquan, GUO Zhengtang, CHEN Yukun, et al. Magnetostratigraphy of marine-terrestrial facies deposits in Bohai Bay[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(1): 9-15.]
- [34] 赵长荣, 胡 J, 阎玉忠, 等. 渤海湾西岸湾顶晚更新世—全新世年代地层序列与地磁极漂移[J]. *地质调查与研究*, 2003, 26(3): 183-192. [ZHAO Changrong, Hus J, YAN Yuzhong, et al. Late Pleistocene-Holocene chronostratigraphic sequence and the geomagnetic polar excursion on the west coast of Bohai Bay[J]. *Geological Survey and Research*, 2003, 26(3): 183-192.]
- [35] 施雅风, 于革. 40~30kaB.P. 中国暖湿气候和海侵的特征与成因探讨[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(1): 1-11. [SHI Yafeng, YU Ge. Warm-humid climate and transgressions during 40-30 ka B.P. and their potential mechanisms[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(1): 1-11.]
- [36] Yang S X, Li J, Mao L M, et al. Assessing pollen distribution patterns and provenance based on palynological investigation on surface sediments from Laizhou Bay, China: An aid to palaeoecological interpretation [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 457: 209-220.
- [37] Yang S X, Liu K B, Yi S, et al. Distribution and provenance of modern pollen and spores in the surface sediments of Liaodong Bay, China[J]. *Marine Geology*, 2016, 376: 1-14.
- [38] Yang S X, Li J, Liu K B, et al. Pollen-spore distribution in the surface sediments of the western Bohai Sea, China[J]. *Quaternary International*, 2016, 392: 213-223.
- [39] 徐家声, 孙延智. 渤海西部近海表层沉积物孢粉组合特征[J]. *海洋通报*, 1988, 7(4): 49-54. [XU Jiasheng, SUN Yanzhi. Spore-pollen assemblages characteristics in surface sediments from the inshore area of western Bohai Sea[J]. *Marine Science Bulletin*, 1988, 7(4): 49-54.]
- [40] Zheng Z, Yang S X, Deng Y, et al. Pollen record of the past 60 ka BP in the Middle Okinawa Trough: terrestrial provenance and reconstruction of the paleoenvironment[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 307(1-4): 285-300.
- [41] 胥勤勉, 袁桂邦, 张金起, 等. 渤海湾沿岸晚第四纪地层划分及地质意义[J]. *地质学报*, 2011, 85(8): 1352-1367. [XU Qinqian, YUAN Guibang, ZHANG Jinqi, et al. Stratigraphic division of the late quaternary strata along the coast of Bohai bay and its geology significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(8): 1352-1367.]
- [42] 李铁刚, 常凤鸣, 于心科. Younger Dryas 事件与北黄海泥炭层的形成[J]. *地学前缘*, 2010, 17(1): 322-329. [LI Tiegang, CHANG Fengming, YU Xinke. Younger Dryas event and the formation of peat layer in the North Yellow Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(1): 322-329.]