

丁国强, 申改慧, 李月丛, 等. 泥河湾盆地上新世末期植被与气候变化的孢粉学记录[J]. 第四纪研究, 2018, 38(2):336-347.

Ding Guoqiang, Shen Gaihui, Li Yuecong, et al. Late Pliocene palynological records of vegetation and climate changes in the Nihewan Basin [J]. Quaternary Sciences, 2018, 38(2):336-347.

doi:10.11928/j.issn.1001-7410.2018.02.06

文章编号: 1001-7410(2018)02-336-12

## 泥河湾盆地上新世末期植被与 气候变化的孢粉学记录\*

丁国强<sup>1,2</sup>, 申改慧<sup>1,2</sup>, 李月丛<sup>1,2</sup>, 王永<sup>3</sup>, 迟振卿<sup>3</sup>, 李冰<sup>1,2</sup>, 阳小兰<sup>4,5</sup>

(1. 河北师范大学资源与环境科学学院, 河北 石家庄 050024; 2. 河北省环境演变与生态建设重点实验室, 河北 石家庄 050024; 3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 4. 河北省科学院地理科学研究所, 河北 石家庄 050011; 5. 河北省地理信息开发应用工程技术研究中心, 河北 石家庄 050011)

**摘要:** 泥河湾盆地沉积巨厚的上新世末至晚更新世的河湖相、湖沼相地层, 是进行上新世至更新世环境变化研究的理想区域。本研究选择泥河湾盆地郝家台 NHA 钻孔的上新统稻地组顶部厚 19.2 m, 深度为 15600~17520 cm, 通过对其岩性段 97 个孢粉和粒度分析, 探讨了该地区上新世末期植被及气候变化特征。根据已有古地磁及地层对比, 采样地层的年代为 2.92~2.56 Ma。分析结果显示, 该时段植被及气候变化可划分为 4 个阶段: 阶段 1 (2.92~2.82 Ma), 松属花粉含量多高于 30%, 云杉属多低于 20%; 阔叶乔木约 13%, 为研究段最高; 草本植物以蒿属、藜科为主, 含量均在 10%~20% 之间, 指示采样点周边应以阔叶林和松林为主, 山地云杉林存在, 气候较温暖湿润。阶段 2 (2.82~2.71 Ma), 云杉属花粉含量明显上升, 最高达 90%, 蒿属和藜科花粉比例也增加明显, 最高可达 80%, 为研究段最高值; 松属花粉含量明显降低, 多低于 10%; 阔叶树木的花粉减少至 5% 以下, 表明在此期间气候总体趋于变冷变干, 且气候变化剧烈, 林线下降, 周边植被以云杉林或草原为主。阶段 3 (2.71~2.66 Ma), 松属花粉含量明显上升, 达 40% 以上, 云杉属含量总体下降, 多低于 30%; 阔叶乔木少见; 蒿属、藜科含量低于 10%; 蕨类孢子约 11%, 达到整段最高值, 指示气候转暖湿, 周边植被以松林为主, 云杉林退至山地, 但阔叶树花粉含量较低, 显示温暖程度低于阶段 1。阶段 4 (2.66~2.56 Ma), 云杉属花粉占绝对优势, 多高于 80%, 松属多低于 10%; 阔叶乔木近乎消失, 暗针叶林扩张, 气候进一步变冷, 进入更新世的冰期环境。由此可见, 上新世末期 (2.92 Ma 以来) 至更新世的气候变化存在明显的 2 个暖期和 2 个冷期。其中研究段代表寒冷气候的云杉属花粉高含量阶段与深海氧同位素代表寒冷的 MIS 102、MIS 104、G2、G6 和 G10 阶段有较好的对应关系。

**关键词:** 泥河湾盆地; 上新世末期; 孢粉分析; 植被; 气候变化

**中图分类号:** P532, Q944.571

**文献标识码:** A

## 0 引言

上新世末期植被及气候特点是第四纪植被与气候形成的基础, 是需要关注的重点之一。上新世末期气候转冷虽基本形成共识<sup>[1-5]</sup>, 但转冷过程及植被响应特征, 不同地区存在差异<sup>[6-7]</sup>。孢粉作为研究古植被、古气候的最重要的手段之一, 在上新世植被变化和气候转型研究中发挥着重要作用<sup>[8-12]</sup>, 但我国此阶段的研究相对薄弱, 仅在青藏高原地区<sup>[13-14]</sup>、云南腾冲地区团田盆地<sup>[15-16]</sup>、华北山西

榆社盆地<sup>[17-20]</sup>和泥河湾盆地<sup>[21-24]</sup>等地作过一些研究, 且分辨率不高。

泥河湾地区因拥有众多旧石器时代早期遗址及中国北方第四纪的标准地层而闻名于世。上新世末期植被和气候特征是第四纪古人类得以出现和繁衍的基础, 这使得泥河湾地区进行高分辨率的上新世古植被、古气候变化孢粉研究尤为重要。前人已通过孢粉等研究对泥河湾盆地上新世末期以来的古植被和古气候变化有了粗略的认识, 不同学者之间研究存在明显差异, 且样品分辨率较低。如陈茅南

2017-11-19 收稿, 2018-01-23 收修改稿

\* 国家自然科学基金项目 (批准号:41472157 和 41171166) 和中国地质调查局项目 (批准号:DD20160345) 共同资助

第一作者简介: 丁国强, 男, 25 岁, 硕士研究生, 自然地理学专业, E-mail:389948743@qq.com

通讯作者: 李月丛, E-mail:lyczhi@aliyun.com

等<sup>[22-23]</sup>通过孢粉分析认为泥河湾盆地大约从 2.9~2.8 Ma 开始, 气候由温暖进入寒冷的冰期; 周廷儒等<sup>[24]</sup>、袁宝印和朱日祥<sup>[25]</sup>推测泥河湾地区上新世时是温暖偏干具有干湿季节之分的暖温带或亚热带气候, 至早更新世早期为一个从温暖湿润气候向温凉干燥气候的转化过程; 刘金陵<sup>[26]</sup>、周昆叔等<sup>[21]</sup>通过红崖南沟等剖面的孢粉分析认为在上新世-早更新世界限存在气候变冷的植被标志, 称为“南沟冷期”。

正确认识上新世植被、气候特征, 需要进行高分辨率的有年代控制的孢粉分析。本文拟在古地磁年代框架的基础上, 通过泥河湾地区上新世末期高分辨率的孢粉记录, 建立高分辨率的孢粉组合及变化序列, 恢复上新世末期植被演替过程, 揭示气候转变特征, 以期更好的理解和揭示泥河湾地区第四纪植被和气候形成基础, 为全球变化和古人类的生存环境研究提供科学依据。

## 1 研究区概况

泥河湾盆地位于河北省张家口市阳原县境内, 地理位置为 40°05'~40°20'N, 114°25'~114°44'E。该区域为明显的大陆性季风气候, 气候变化剧烈, 年均气温约 7~8℃, 年均降水量在 360~420 mm 之间。泥河湾盆地是发育于华北平原与内蒙古高原过渡带的晚新生代断陷盆地, 盆地四周为山地围绕, 北侧为熊耳山, 南侧是六棱山, 东侧为凤凰山, 盆地总面积约 2000 km<sup>2</sup>, 平均海拔在 1000 m 左右。植被具有暖温带落叶阔叶林向温带半干旱、干旱草原过渡的特点, 盆地内部以半干旱、干旱灌丛草原

为主, 周边山地以森林为主(图 1)。湖盆发育始于上新世晚期, 充填了厚层的上新统-更新统河湖相地层, 晚更新世随着地块抬升和溯源侵蚀加剧, 湖水外泄, 湖相地层停止发育<sup>[24,27]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与岩性描述

沉积物样品采集地点位于河北省阳原县泥河湾盆地东部化稍营郝家台的 NHA 钻孔, 钻孔坐标: 40°13'0.4"N, 114°38'32.3"E; 938 m a. s. l.。2013 年中国地质科学院地质研究所进行了打钻, 取样深度共 365.82 m。本文旨在研究上新世末期环境演变, 故样品取自上新统稻地组顶部, 厚 19.2 m, 深度为 15600~17520 cm, 该段钻孔岩芯每 20 cm 采集一个样品, 共取得样品 97 个。该段以青灰、深棕色粘土与粉砂沉积为主, 具水平层理, 含软体动物化石、炭屑和大量钙板, 主要属于湖沼相、三角洲相沉积环境<sup>[28]</sup>(图 2)。

### 2.2 年代测定

根据已有古地磁及地层对比, 泥河湾组底即 NHA 钻孔 157 m 处与 M/G 界限吻合, 年龄约 2.58 Ma; 另在 210 m 处测得为吉尔伯特反向极性时顶部界限, 时间约为 3.60 Ma<sup>[29-30]</sup>(图 2), 由已有古地磁及年代可以推算 15600~17520 cm 段顶部年龄为 2.56 Ma, 底部年龄为 2.92 Ma, 沉积速率约 19 ka/m, 从而得出钻孔年代。

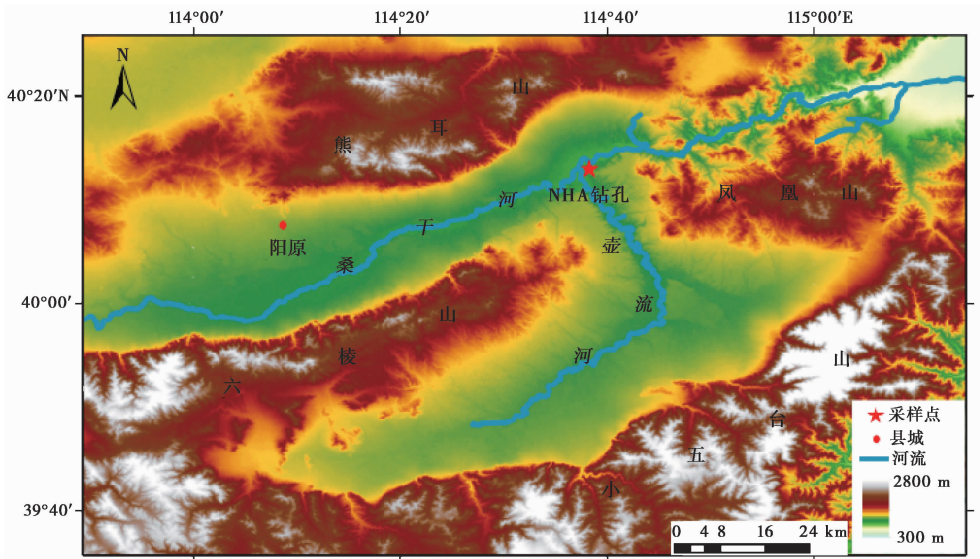


图 1 研究区地势简图及采样点位置

Fig. 1 Hypsometric map and sampling position of the study area

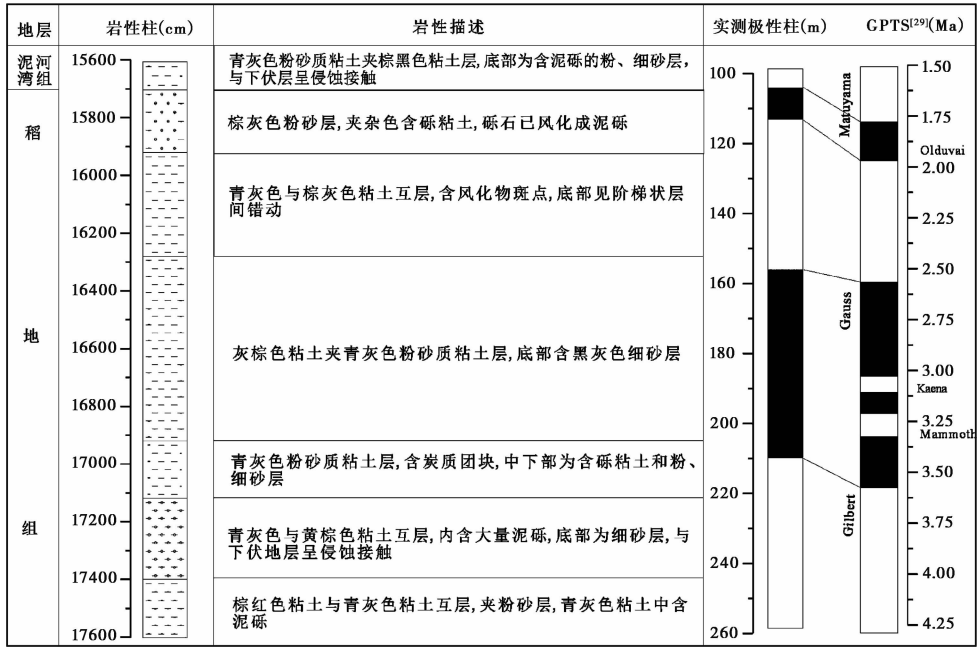


图2 泥河湾盆地 NHA 钻孔 15600~17520 cm 岩性段岩性综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive lithology bar graph from 15600 cm to 17520 cm in the NHA drilling of Nihewan Basin

## 2.3 孢粉分析

实验室孢粉提取采用常规的 HCl-NaOH-HF 处理法<sup>[31]</sup>,化学处理前每个样品(50 g)中加入一粒现代石松孢子片(27637±563 粒)做指示剂,以计算孢粉浓度,实验处理好的样品采用重液浮选的方法收集样品中的孢粉。孢粉鉴定与统计在 400 倍 Imager A2 光学显微镜下完成,多数样品鉴定统计孢粉 400 粒以上或近 400 粒。孢粉鉴定主要参考《中国植物花粉形态》<sup>[32]</sup>、《中国第四纪孢粉图鉴》<sup>[33]</sup>和保存在河北师范大学资源与环境科学学院环境演变与生态建设重点实验室的现代孢粉标本。

## 2.4 粒度分析

粒度测试在河北师范大学资源与环境科学学院粒度分析实验室进行,使用英国马尔文公司生产的 Malvern Mastersizer 3000 型激光粒度仪进行实验相关操作。机器测量范围为 0~3500 μm,重复测量误差小于 2%。测试前用常规处理方法对样品进行了去除有机质、碳酸钙等处理<sup>[34-35]</sup>,测量时使用一次性塑料滴管吸取搅拌均匀的样品,加至遮光度在 10%~20% 时进行,经过 3 次测量并取其平均值作为最终结果。

## 3 结果与分析

### 3.1 孢粉分析

泥河湾盆地郝家台 NHA 钻孔 97 个孢粉样品共

鉴定出 63 个孢粉类型,其中包括 19 种乔木植物花粉类型、9 种灌木植物花粉类型、25 种草本植物花粉类型和 10 种蕨类孢子与藻类。共统计孢粉 55212 粒(不包括藻类),平均每个样品统计 569 粒,孢粉总浓度平均每个样品为 1238 粒/g。其中常见的乔木植物花粉类型包括松属(*Pinus*)、云杉属(*Picea*)、栎属(*Quercus*)、榆属(*Ulmus*)、桦木属(*Betula*)、胡桃属(*Juglans*)、椴树属(*Tilia*)等;常见的灌木植物花粉类型有绣线菊属(*Spiraea*)、木樨科(*Oleaceae*)、胡颓子属(*Elaeagnus*)、虎榛子属(*Ostryopsis*)等;草本植物花粉主要有蒿属(*Artemisia*)、藜科(*Chenopodiaceae*)、禾本科(*Poaceae*)、菊科(*Asteraceae*)、十字花科(*Brassicaceae*)、荨麻属(*Urtica*)和葎草属(*Humulus*)等;蕨类孢子以单缝孢(*Monolete*)、三缝孢(*Triletes*)、卷柏科(*Selaginellaceae*)、水龙骨科(*Polypodiaceae*)为主。根据孢粉鉴定统计分析结果,结合孢粉浓度的变化情况,使用 CONISS 软件对孢粉百分比数据进行有序聚类分析,将郝家台 NHA 钻孔 15600~17520 cm 岩性段自下而上划分为 4 个孢粉带(图 3 和图 4):

孢粉带 1(17520~16980 cm, 2.92~2.82 Ma): 本带共有 28 个样品,孢粉总浓度平均为 136 粒/g,为研究段最低,平均每个样品鉴定 319 粒。孢粉组合中乔木植物花粉平均 71.31%(18.27%~99.82%),占绝对优势,其中针叶树花粉含量平均达 60%,松属花粉含量多高于 30%,云杉属多低于

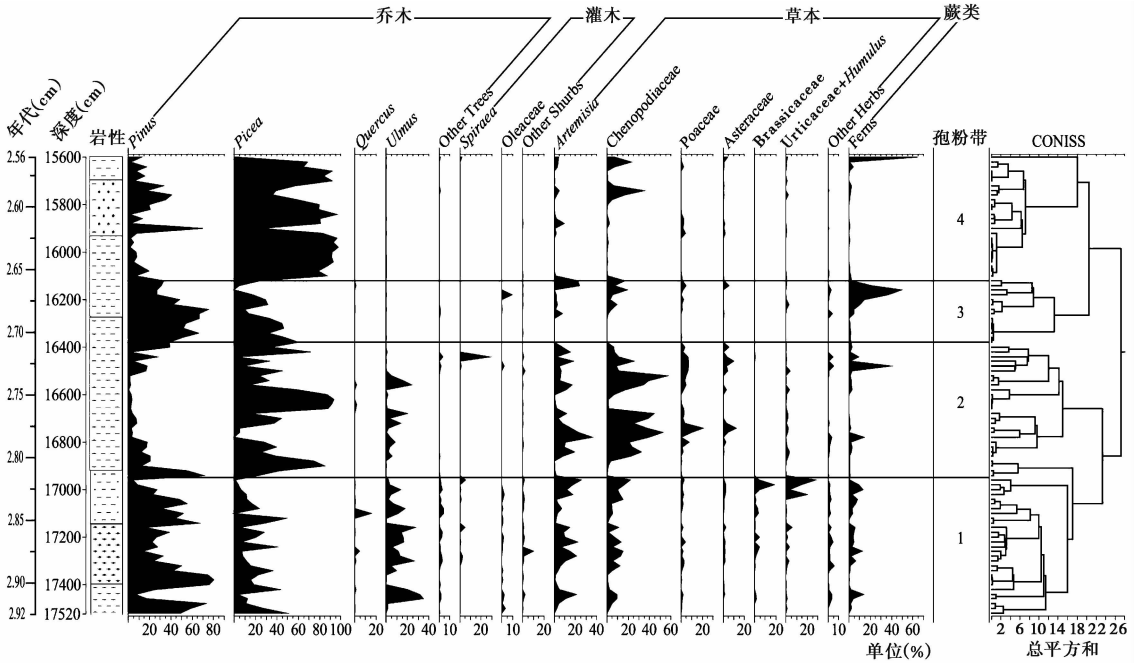


图 3 泥河湾盆地 NHA 钻孔 15600~17520 cm 岩性段孢粉百分比图

Fig. 3 Pollen percentages from 15600 cm to 17520 cm in the NHA drilling of Nihewan Basin

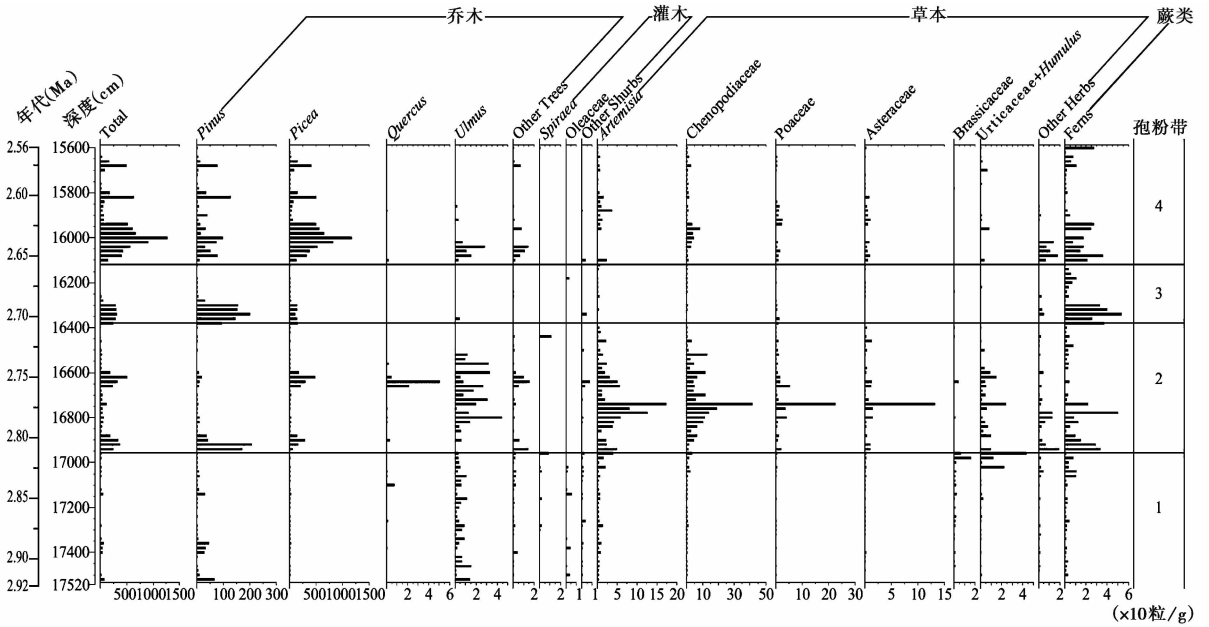


图 4 泥河湾盆地 NHA 钻孔 15600~17520 cm 岩性段孢粉浓度图

Fig. 4 Pollen concentrations from 15600 cm to 17520 cm in the NHA drilling of Nihewan Basin

20%，阔叶乔木为研究段最高，含量约 13%，以榆属 (10.49%) 为主，栎属、胡桃属、楝科 (Meliaceae) 等喜暖花粉可见；草本植物以蒿属、藜科为主，两者含量基本相当，均在 10%~20% 之间，禾本科与十字花科植物花粉常见；其余还出现少量蕨类植物孢子 (平均 4.18%) 和灌木植物花粉 (平均 2.12%)，蕨类以单缝孢 (Monoletes) 和三缝孢 (Triletes) 为主，灌木花粉中常见绣线菊属、木樨科和虎榛子属。

孢粉带 2 (16980~16380 cm, 2.82~2.71 Ma)：本带共包含有 30 个样品，孢粉总浓度比孢粉带 1 明显增高，平均每个样品为 1024 粒/g，平均每个样品鉴定 568 粒。云杉属花粉含量明显上升，但波动剧烈，最高达 90%，最低低于 10%，多数在 30% 以上，松属花粉含量显著降低，多低于 10%，阔叶树木花粉减少至 5% 以下；草本植物花粉百分比含量增加明显，为整个研究段最高值，平均达到

36.91% (0.30% ~ 90.23%), 其中蒿属和藜科花粉比例最高, 两者花粉总量最高可达 80%, 但藜科花粉含量明显高于蒿属, 藜科花粉多在 20% ~ 40% 之间, 蒿属多在 10% ~ 20%, 禾本科 (3.49%)、菊科 (1.88%) 花粉含量也达到研究段最高值; 灌木花粉和蕨类孢子含量与上带相比无明显变化, 孢粉组合中云杉花粉和蒿藜等草本花粉在含量上存在明显此消彼长关系。

孢粉带 3 (16380 ~ 16120 cm, 2.71 ~ 2.66 Ma): 本带共有 13 个样品, 孢粉浓度略降至 949 粒/g, 平均每个样品鉴定 552 粒。孢粉组合中, 松属花粉含量显著上升, 达 40% 以上, 云杉属含量较上带下降, 多低于 30%, 阔叶乔木花粉少见; 草本植物花粉含量明显下降, 平均含量仅 12.6% (0.16% ~ 42.13%), 蒿属、藜科花粉含量低于 10%, 禾本科、菊科等草本植物花粉均有明显下降; 蕨类孢子平均含量升高到整阶段最高值, 平均达 11.45%, 主要以水龙骨科、单缝孢为主, 三缝孢与卷柏科可见; 灌木花粉含量较低, 不足于 1%。

孢粉带 4 (16120 ~ 15600 cm, 2.66 ~ 2.56 Ma): 本带有 26 个样品, 孢粉总浓度上升到 2817 粒/g, 为整个研究段最高值, 平均每个样品鉴定 848 粒。云杉属花粉占绝对优势, 多高于 80%, 为整段最高值, 松属多低于 10%, 阔叶乔木含量近乎消失; 草本植物花粉降低到 7.22% (0.35% ~ 40.82%), 达到研究段最低值; 灌木与蕨类约占总量的 3%。

### 3.2 粒度分析

通过 97 个粒度数据分析表明, 沉积物总体以粉砂 (4 ~ 63  $\mu\text{m}$ ) 为主, 平均含量达 72.06%, 粘土 (< 4  $\mu\text{m}$ ) 和砂 (> 63  $\mu\text{m}$ ) 的平均含量差别不大, 分别占 13% 和 14.94%, 中值粒径平均为 23.07  $\mu\text{m}$ , 钻孔岩性粒度总体较细, 连续性好, 根据沉积物整体粒度特征与变化情况, 把钻孔 15600 ~ 17520 cm 岩性段自下而上划分为与孢粉一致的 4 个带 (图 5):

带 1 (17520 ~ 16980 cm, 2.92 ~ 2.82 Ma): 本带以青灰、黄棕色粉砂质粘土为主, 含细砂层、炭质团块与大量泥砾; 沉积物颗粒较粗, 中值粒径平均为 26.79  $\mu\text{m}$  (10.30 ~ 74.10  $\mu\text{m}$ ), 粘土平均含量为 10.36% (4.55% ~ 18.30%), 粉砂平均为 70.59% (39.61% ~ 83.30%), 均为研究段最低值, 砂 (平均为 19.05%, 在 1.16% ~ 54.29% 之间) 含量为研究段最高值。

带 2 (16980 ~ 16380 cm, 2.82 ~ 2.71 Ma): 本带以灰棕色粘土层为主夹青灰色粉砂质粘土; 该段中值粒径平均为 27.22  $\mu\text{m}$  (9.65 ~ 88.30  $\mu\text{m}$ ), 为研究段最大值, 较带 1 略有上升; 粉砂平均含量为 70.82% (34.04% ~ 85.61%), 砂的平均含量为 17.81% (1.71% ~ 62.87%), 均较带 1 略有下降, 粘土 (平均为 11.37%, 在 2.07% ~ 21.78% 之间) 平均含量有小幅上升。

带 3 (16380 ~ 16120 cm, 2.71 ~ 2.66 Ma): 本带

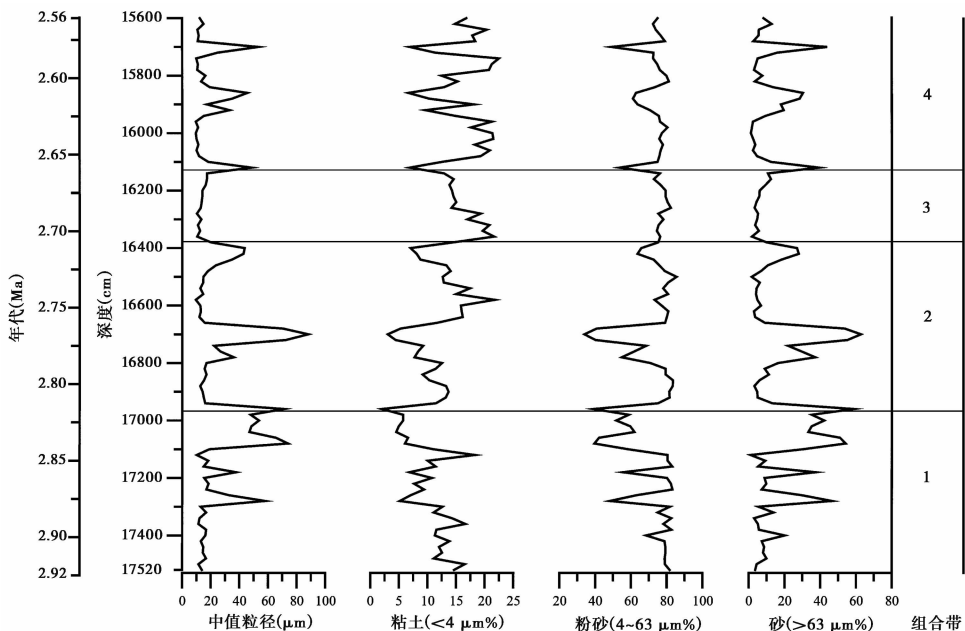


图 5 泥河湾盆地 NHA 钻孔 15600 ~ 17520 cm 岩性段粒度变化曲线

Fig. 5 Grain size parameter curves from 15600 cm to 17520 cm in the NHA drilling of Nihewan Basin

以青灰、棕灰粘土为主, 见阶梯状层间错动; 沉积物粒径较细, 中值粒径平均为  $16.42 \mu\text{m}$  ( $10.40 \sim 48.60 \mu\text{m}$ ), 相比带 2 有所下降, 为研究段最低值; 粘土、粉砂平均含量均明显高于带 2, 分别为  $15.77\%$  ( $6.93\% \sim 21.67\%$ ) 和  $75.52\%$  ( $53.71\% \sim 82.42\%$ ), 砂的平均含量为  $8.71\%$  ( $1.84\% \sim 39.36\%$ ), 较带 2 明显降低。

带 4 ( $16120 \sim 15600 \text{ cm}$ ,  $2.66 \sim 2.56 \text{ Ma}$ ): 本带以深灰色粉砂与粉砂质粘土为主, 含细沙层, 存在侵蚀接触关系; 中值粒径平均为  $17.59 \mu\text{m}$  ( $9.59 \sim 53.20 \mu\text{m}$ ), 较带 3 略有上升; 粘土 (平均为  $16.32\%$ , 在  $6.69\% \sim 22.50\%$  之间) 和砂 (平均为  $10.34\%$ , 在  $1.24\% \sim 43.88\%$  之间) 的含量相比带 3 有所上升, 粉砂含量相对降低, 其平均值为  $73.34\%$  ( $49.19\% \sim 81.28\%$ )。

## 4 讨论

### 4.1 上新世末期古植被与古气候变化特征

目前, 研究区在植被区划上大部分地区属暖温带落叶阔叶林区, 只有阳原县西北部属于温带草原区, 气候属温带大陆性季风气候, 年均气温  $7 \sim 8 \text{ }^\circ\text{C}$ , 年均降水量在  $360 \sim 420 \text{ mm}$  之间<sup>[24]</sup>。从孢粉组合看, 上新世末期泥河湾盆地总体以松属、云杉属等针叶树花粉为主, 乔木花粉总体含量高于  $60\%$ , 表明上新世末期研究区主要以森林植被景观为主。但不同时段孢粉组合存在明显变化, 早期暖湿的阔叶树花粉含量较高, 晚期以代表冷湿的云杉属占绝对优势, 偏干的蒿属、藜科等草本植物花粉在个别时段占较大优势。根据孢粉组合的变化情况, 可将泥河湾盆地上新世末期古植被演替和气候转变过程分成 4 个阶段, 其中包括 2 个暖期 ( $2.92 \sim 2.82 \text{ Ma}$  与  $2.71 \sim 2.66 \text{ Ma}$ ) 与 2 个冷期 ( $2.82 \sim 2.71 \text{ Ma}$  与  $2.66 \sim 2.56 \text{ Ma}$ ) :

$2.92 \sim 2.82 \text{ Ma}$  为第一个暖期, 此时喜暖湿的阔叶树花粉为研究段最高值, 以榆属、栎属为主, 松属花粉含量较高, 还零星出现山核桃属、楝科、常绿栎等亚热带成分, 喜冷的云杉属花粉含量为研究段最低, 反映较为暖湿的气候。李文漪和姚祖驹<sup>[36]</sup>通过对花粉类型与植被定量关系研究认为, 松花粉在  $30\%$  以上, 可能有松林存在, 李月丛等<sup>[37]</sup>和许清海等<sup>[38]</sup>对阔叶林表土花粉研究表明, 榆属、栎属等阔叶树均为容易被低估的花粉类型, 含量一般在  $1\%$  以上时, 表明周围存在该植物的可能性很大。该时期松属花

粉多高于  $30\%$ , 榆树花粉约  $10\%$ , 指示该时期植被应为有松参与的以榆、栎为主的阔叶林。

$2.82 \sim 2.71 \text{ Ma}$  为第一个变冷阶段, 该阶段喜冷的云杉属花粉和喜干的蒿属、藜科等草本花粉成为孢粉组合中最主要的成分, 且两者在含量上此消彼长, 喜温松属与阔叶树花粉含量明显降低且较暖期下降, 多低于  $10\%$ , 山核桃属等亚热带成分消失。该期尽管总花粉浓度较高 (图 4), 但以蒿属、藜科增加最为显著, 因此认为该阶段总体研究区温、湿度下降, 特别是干旱化明显; 植被也表现为云杉林和以蒿属、藜科及禾本科等为主的草原交替出现的景观。

$2.71 \sim 2.66 \text{ Ma}$  为第二个暖期, 该时期松属花粉含量多高于  $40\%$ , 略高于第一个暖期, 但同时云杉属花粉百分比及浓度均高于第一个暖期, 且阔叶乔木少见并明显低于第一个暖期, 蕨类孢子达到全段最高值。可能表明, 此时气候暖湿, 但温暖程度不及  $2.82 \text{ Ma}$  之前的第一个温暖期, 该时期植被组成中松林比例扩大, 阔叶林基本消失, 山地有云杉林存在, 且面积较第一暖期略有扩张。

$2.66 \sim 2.56 \text{ Ma}$  为第二个变冷阶段, 同时也是最寒冷的阶段, 此时, 云杉属花粉在孢粉组合占绝对优势, 多高于  $80\%$ , 且有云杉气孔器出现, 表明以云杉为主的暗针叶林已扩张至低海拔的湖滨地区并占绝对优势, 气候从温带演变为寒温带气候, 进入更新世最早的冰期环境。

### 4.2 环境变化与湖泊演化

在新生代晚期, 阳原和蔚县两盆地的底部由于不断断陷并积水成湖, 从而开始泥河湾盆地湖泊演化的历史阶段<sup>[24]</sup>。但泥河湾盆地受构造运动及全球气候变化双重因素的影响。通常情况下, 湖泊沉积物颗粒粒径的大小可直接反映了沉积水动力状况, 如果构造影响较小时, 粒度能灵敏地记录当时气候的干湿状况, 是恢复古环境及湖泊演化状况的重要替代指标之一<sup>[34, 39-41]</sup>, 在长时间尺度、低分辨率 (百年、千年) 研究中, 沉积物粒度主要反映湖泊水动力大小、湖平面的升降变化和湖盆的扩展和收缩过程: 粒径大指示湖泊收缩、湖水较浅的气候干旱期; 粒径小指示湖泊扩张、湖水较深的湿润气候期<sup>[42-46]</sup>; 但在构造运动影响强烈时期, 粒度可能只能指示湖泊水动力大小, 不能反映气候的变化<sup>[47]</sup>。孢粉是植物的直接产物, 孢粉组合的变化主要反映气候的变化, 较少受构造运动影响<sup>[48-50]</sup>。因此可以

认为,如果粒度与孢粉组合反映的气候变化较一致时,构造运动对泥河湾古湖水动力的影响较小或者为构造不太活跃时期,如果孢粉组合与粒度反映的气候出现矛盾时,则可能因为粒度较大程度上受到了构造运动的影响。

从研究段沉积物分析来看,其中沉积物颜色以灰青色为主,粒度上中值粒径整体趋于变细,粘土百分比含量逐渐增高,砂含量逐渐降低,表明研究区在该时期主要为湖面扩张阶段,与前人研究结果相一致<sup>[24,51]</sup>。但不同时间段,粒度与孢粉组合反映的环境变化存在一定差异。2.92~2.82 Ma,孢粉组合显示研究区气候暖湿,但此时沉积物粒度整体较粗,>63 μm 颗粒含量最高,且孢粉浓度为研究段最低,闵隆瑞等<sup>[28]</sup>认为该时段为湖泊形成期,湖水位仍然较浅,采样点接近湖边,水动力较强,故沉积物粒度较粗;在此沉积环境下,不利于孢粉保存<sup>[52-54]</sup>,使得花粉浓度较低,该阶段应为构造运动较为强烈的阶段。自2.82 Ma至2.66 Ma,沉积物粒度较粗时,云杉属或蒿属、藜科花粉含量较高,气候相对干冷,湖面萎缩;沉积物颗粒较细时,松属花粉含量较高,气候暖湿,

湖面扩张,粒度与孢粉组合反映的气候变化有较好的一致性,表明该阶段为构造运动相对不太活跃时期。2.66 Ma之后,孢粉组合显示气候为最冷期,但沉积物粒度总体较细,粘土含量较高,表明水位相对较高,两者反映的环境状况不完全一致,前人研究<sup>[47,55]</sup>指出此时期泥河湾古湖泊面积增大并趋于稳定,采样点距离湖岸较远,故沉积物颗粒较细,该阶段接近第四纪,可能构造运动又成为湖泊水位变化的主要因素。

### 4.3 区域对比

泥河湾盆地郝家台地区 NHA 钻孔孢粉记录的上新世末期古植被和气候特征与华北、中国乃至世界有较好的一致性<sup>[56-57]</sup>(图6)。如2.82 Ma之前的暖湿气候,在华北其他地区也有类似的记录:曹家欣等<sup>[17]</sup>通过榆社上新世晚期植物群与山旺中新世植物群对比,认为榆社盆地上新世晚期虽不及山旺中新世炎热潮湿,但仍反映一定程度的暖温带向亚热带过渡特征;Qin等<sup>[58-59]</sup>利用共存分析方法定量重建了榆社张村地区晚上新世温度和降水等,推

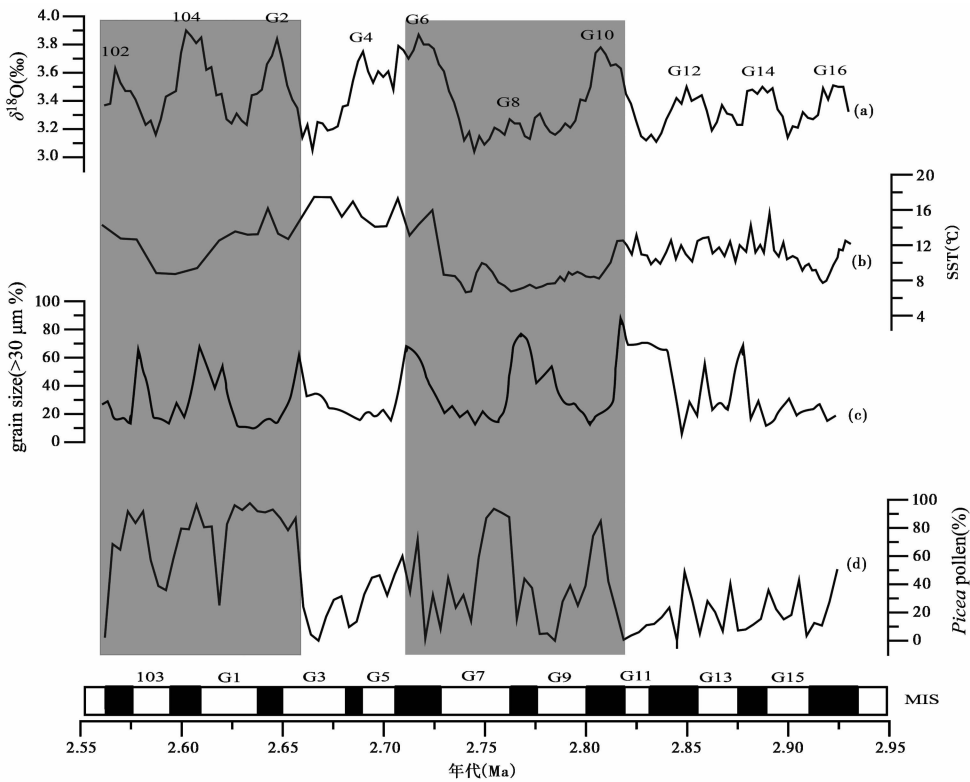


图6 泥河湾盆地 NHA 钻孔孢粉记录的上新世末期降温过程

(a) LR04 氧同位素<sup>[56]</sup>; (b) 太平洋 ODP 882 海水表面温度<sup>[57]</sup>; (c) NHA 钻孔粒度百分比含量; (d) NHA 钻孔云杉属花粉百分比含量

Fig. 6 Pollen records of the cooling process in the NHA drilling of Nihewan Basin in the Late Pliocene.

(a) LR04 benthic  $\delta^{18}O$  stack<sup>[56]</sup>; (b) ODP Site 882 in the Pacific<sup>[57]</sup>; (c) Grain size percentages in the NHA drilling; (d) *Picea* pollen percentages in the NHA drilling

测出当时古气候和古环境更加温暖湿润。

2.8 Ma 左右的寒冷事件在国内外多个研究中也有表现。如, 陈茅南等<sup>[22]</sup>对阳原-蔚县盆地与 Liu 等<sup>[19]</sup>对榆社盆地花粉研究均表明 2.8 Ma 左右开始, 孢粉组合中云杉属、冷杉属、蒿属、藜科占较大比例, 植被向草原化演化, 气候变得寒冷干旱; 李杏茹等<sup>[60]</sup>在黄土高原保德地区、沈才明和唐领余<sup>[13]</sup>在藏北及藏西南、吴珍汉等<sup>[14]</sup>在柴达木盆地的花粉研究, 均指示上新世晚期植被类型由早期松属、云杉属、栎属、榆属等针阔混交林向蒿属、藜科等代表的草原植被转变的过程; 王伟铭等<sup>[61-62]</sup>对内蒙古商都、山东章丘上新世地层孢粉研究同样认为上新世末期该地仍有一些阔叶树种分布, 而亚热带和暖温带成分则已全部消失, 植物群反映当时气候的逐渐变冷和变干过程; Yang 和 Ding<sup>[63]</sup>在黄土高原通过沉积速率研究认为 2.8 Ma 左右已经存在黄土堆积, 可能代表一次寒冷事件。从世界范围来看, 该寒冷期在西北太平洋海表温度中<sup>[57]</sup>有较好的体现, 该时期海表温度较之前降低了约 2℃; Kleiven 等<sup>[64]</sup>、Venti 和 Billups<sup>[65]</sup>在北太平洋、环北大西洋、格陵兰岛等高纬地区研究结果也认为, 在 2.75 Ma 左右冰盖面积进一步扩张; 该时段的寒冷期与代表寒冷气候的 G6 和 G10 具有较好的对应关系<sup>[56,66]</sup>, 但在 G8 阶段表现不明显(图 6)。总体表明该阶段的寒冷气候具有一定的广泛性。

2.66~2.56 Ma 期间的寒冷事件得到中国及世界不同地区研究结果的证实。如, 与泥河湾地区相邻的山西榆社张村剖面的研究显示上新世-更新世之交张村组上部, 前期优势孢粉类型为榆属、鹅耳枥属、栎属和山核桃属等, 后期以松属和云杉属等占优势, 指示了植被由阔叶林向针叶林的过渡<sup>[18]</sup>; 黄土高原天水盆地的孢粉研究结果同样表明, 2.74~2.60 Ma 期间, 植被为针叶林, 气候凉爽、湿润, 湖泊较深, 发育灰绿色湖相沉积物, 温度进一步降低<sup>[67]</sup>; 方小敏等<sup>[68]</sup>通过对亚洲内陆干旱区柴达木盆地中央鸭湖剖面孢粉和盐类化学指标的初步研究, 2.6 Ma 后耐旱植物花粉含量与盐度指标均呈现明显长期增加趋势, 气候快速向更干旱方向发展。该冰期气候为全球性气候事件, 在世界各地均有表现<sup>[11,19-20,69-76]</sup>, 西北太平洋海水表面温度也在此阶段达到最低。本研究还显示, 在该寒冷时期, 寒冷程度也存在一定差异, 高的云杉属花粉含量和沉积物粗颗粒高含量阶段与代表寒冷气候的深海氧同位素 MIS 102、MIS 104 与 G2 阶段有较好对应关系(图 6)。

## 5 结论

选择泥河湾盆地郝家台 NHA 钻孔的上新统稻地组顶部厚 19.2 m, 深度为 15600~17520 cm, 通过其岩性段的 97 个样品的孢粉和粒度分析, 探讨了该地区上新世末期植被及气候变化特征如下:

(1) 上新世末期泥河湾郝家台地区孢粉组合以乔木花粉占优势, 反映植被总体以森林为主, 气候较今湿润。

(2) 根据花粉组合的变化, 显示研究区植被与古气候变化经历了 4 个阶段: 2.92~2.82 Ma, 该段阔叶树花粉含量最高, 采样点周边以松、阔叶林为主, 云杉主要出现于高海拔山地, 总体气候温暖湿润; 2.82~2.71 Ma, 花粉组合变化剧烈, 与云杉属为主的花粉组合与以蒿属、藜科为主的花粉组合交替出现, 显示植被为暗针叶林与草原交替出现, 且不同时段有冷干和冷湿的变化; 2.71~2.66 Ma, 植被以松林为主, 气候回暖, 但阔叶树花粉含量较低, 表明温暖程度不及 2.82 Ma 之前; 2.66~2.56 Ma, 花粉组合中云杉属花粉占绝对优势, 阔叶树花粉近乎消失, 指示植被以云杉林为主, 气候最为寒冷, 进入更新世的冰期环境。

(3) 上新世末期泥河湾地区气候变化存在明显的两个暖期和两个冷期。其中, 孢粉组合指示的气候变化与西北太平洋海表温度均有较好的一致性, 且云杉属花粉高含量阶段对应于深海氧同位素代表寒冷气候的 MIS 102、MIS 104、G2、G6 和 G10。

**致谢:** 真诚地感谢同行评审专家和编辑部老师提出的宝贵修改意见!

## 参考文献 (References):

- [1] Maslin M A, Haug G H, Sarnthein M, et al. The progressive intensification of Northern Hemisphere glaciation as seen from the North Pacific [J]. *Geologische Rundschau*, 1996, 85 (3): 452-465.
- [2] Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present [J]. *Science*, 2001, 292(5517): 686.
- [3] Mudelsee M, Raymo M E. Slow dynamics of the Northern Hemisphere glaciation [J]. *Paleoceanography*, 2005, 20(4): 230-250.
- [4] Bintanja R, van de Wal R S. North American ice-sheet dynamics and the one of 100000-year glacial cycles [J]. *Nature*, 2008, 454(7206): 869.
- [5] Zachos J C, Dickens G R, Zeebe R E, et al. An Early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics [J]. *Nature*, 2008, 451(7176): 279.



- [6] Ravelo A C, Andreasen D H, Lyle M, et al. Regional climate shifts caused by gradual global cooling in the Pliocene epoch[J]. *Nature*, 2004, 429(6989):263.
- [7] Maslin M A, Li X S, Loutre M F, et al. The contribution of orbital forcing to the progressive intensification of Northern Hemisphere glaciation[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1998, 17(4-5):411-426.
- [8] Zagwijn W H. Aspects of the Pliocene and Early Pleistocene vegetation in the Netherlands [J]. *Mededelingen Geologische Stichting; Serie C*, 1960, 3(5):78.
- [9] Zagwijn W H. Variations in climate as shown by pollen analysis, especially in the Lower Pleistocene of Europe [J]. *Geological Journal*, 1975, (6):137-152.
- [10] Popescu S M, Biltekin D, Winter H, et al. Pliocene and Lower Pleistocene vegetation and climate changes at the European scale: Long pollen records and climatostratigraphy [J]. *Quaternary International*, 2010, 219(1):152-167.
- [11] Brighamrette J, Melles M, Minyuk P, et al. Pliocene warmth, polar amplification, and stepped Pleistocene cooling recorded in NE Arctic Russia[J]. *Science*, 2013, 340(6139):1421-1427.
- [12] Andreev A A, Tarasov P E, Wennrich V, et al. Millennial-scale vegetation changes in the north-eastern Russian Arctic during the Pliocene/Pleistocene transition (2.7-2.5 Ma) inferred from the pollen record of Lake El'gygytyn [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 147:245-258.
- [13] 沈才明, 唐领余. 青藏高原南部上新世花粉植物群及其古气候[J]. *地层学杂志*, 1992, 16(4):264-269.  
Shen Caiming, Tang Lingyu. Pliocene pollen flora and its paleoclimate in the southern Tibetan Plateau [J]. *Stratigraphy Magazine*, 1992, 16(4):264-269.
- [14] 吴珍汉, 吴中海, 胡道功, 等. 青藏高原新生代构造演化与隆升过程[M]. 北京: 地质出版社, 2009:1-333.  
Wu Zhenhan, Wu Zhonghai, Hu Daogong, et al. *Tectonic Evolution and Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009:1-333.
- [15] 吴靖宇. 云南腾冲上新世团田植物群及其古环境分析[D]. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2009:55-74.  
Wu Jingyu. *The Pliocene Tuantian Flora of Tengchong, Yunnan Province and Its Paleoenvironmental Analysis* [D]. Lanzhou: The Doctoral Thesis of Lanzhou University, 2009:55-74.
- [16] Xie S P, Sun B N, Wu J Y, et al. Palaeodimatic estimates for the Late Pliocene based on leaf physiognomy from western Yunnan, China[J]. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 2014, 21(2):251-261.
- [17] 曹家欣, 崔海亭. 山西榆社盆地上新世植物群及其环境意义[J]. *地质科学*, 1989, (4):369-375, 405.  
Cao Jiaxin, Cui Haiting. Research of Pliocene flora and paleoenvironment of Yushe Basin on Shanxi Plateau, China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1989, (4):369-375, 405.
- [18] Shi Ning, Cao Jiaxin, Lars K K, et al. Late Cenozoic vegetational history and the Pliocene-Pleistocene boundary in the Yushe Basin, S. E. Shanxi, China[J]. *Grana Palynologica*, 2009, 32(4-5):260-271.
- [19] Liu G, Leopold E B, Liu Y, et al. Palynological record of Pliocene climate events in North China [J]. *Review of Palaeobotany & Palynology*, 2002, 119(3):335-340.
- [20] Li X Q, Li C S, Lu H Y, et al. Paleovegetation and paleoclimate in Middle-Late Pliocene, Shanxi, Central China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 210(1):57-66.
- [21] 周昆叔, 梁秀龙, 严富华, 等. 从泥河湾层花粉分析谈南沟冷期等问题[J]. *地质科学*, 1983, (1):82-92.  
Zhou Kunshu, Liang Xiulong, Yan Fuhua, et al. Some remarks on the Nangou cold period based on the analysis of the pollen from the Nihewan stratum [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1983, (1):82-92.
- [22] 陈茅南, 王云生, 王淑芳, 等. 河北阳原-蔚县盆地泥河湾层的研究[J]. *中国地质科学院院报*, 1987, (1):149-160.  
Chen Maonan, Wang Yunsheng, Wang Shufang, et al. Study of Nihewan beds in basin of Yangyuan, Yuxian, Hebei Province[J]. *China Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1987, (1):149-160.
- [23] 陈茅南. 泥河湾层的研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1988:1-145.  
Chen Maonan. *Study on the Nihewan Formation* [M]. Beijing: China Ocean Press, 1988:1-145.
- [24] 周廷儒, 李华章, 刘清泗, 等. 泥河湾盆地新生代古地理研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991:1-162.  
Zhou Tingru, Li Huazhang, Liu Qingsi, et al. *Cenozoic Paleogeography Research of Nihewan Basin* [M]. Beijing: Science Press, 1991:1-162.
- [25] 袁宝印, 朱日祥. 泥河湾组的时代、地层划分和对比问题[J]. *中国科学(D辑)*, 1996, (1):67-73.  
Yuan Baoyin, Zhu Rixiang. Age stratum division and contrast of Nihewan Formation[J]. *Science in China(Series D)*, 1996, (1):67-73.
- [26] 刘金陵. 泥河湾组的孢粉组合及其地质时代[J]. *科学通报*, 1980, 25(4):177-179.  
Liu Jinling. Pollen assemblages and their geological age in the Nihewan Formation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1980, 25(4):177-179.
- [27] 夏正楷, 刘锡清. 泥河湾层古地理环境的初步认识[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1984, (3):101-110.  
Xia Zhengkai, Liu Xiqing. On paleogeography of the Nihewan Basin during the accumulation of Nihewan[J]. *Series Geology & Quaternary Geology*, 1984, (3):101-110.
- [28] 闵隆瑞, 迟振卿, 王永, 等. 河北阳原泥河湾盆地郝家台 NHA 钻孔岩芯岩石地层划分及对比[J]. *中国地质*, 2015, 42(4):1068-1078.  
Min Longrui, Chi Zhenqing, Wang Yong, et al. Lithostratigraphic division and correlation of Haojiatai NHA borehole from Nihewan Basin in Yangyuan, Hebei[J]. *Geology in China*, 2015, 42(4):1068-1078.
- [29] Ogg J G. The geomagnetic polarity timescale [M] // Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, et al. *The Geologic Time Scale 2012*. Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 2012:85-113.
- [30] 刘平, 邓成龙, 李仕虎, 等. 泥河湾盆地地下沙沟动物群的磁性地层学定年及其对泥河湾动物群的年代制约[J]. *第四纪研究*, 2016, 36(5):1176-1190.  
Liu Ping, Deng Chenglong, Li Shihu, et al. Magnetstratigraphic dating of the Xiashagou fauna and implication for sequencing the mammalian faunas in the Nihewan Basin, North China [J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(5):1176-1190.
- [31] Fægri K, Kaland P E, Krzywinski K, et al. *Textbook of pollen analysis*[J]. *Journal of Biogeography*, 1989, 12(12):328.
- [32] 王伏雄, 钱南芬, 张玉龙, 等. 中国植物花粉形态[M]. 北京:

- 科学出版社, 1995:1-461.
- Wang Fuxiong, Qian Nanfen, Zhang Yulong, et al. Pollen Morphology in China[M]. Beijing: Science Press, 1995:1-461.
- [33] 唐领余, 毛礼米, 舒军武, 等. 中国第四纪孢粉图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 2016:1-601.
- Tang Lingyu, Mao Limi, Shu Junwu, et al. Quaternary Pollen Illustrated in China[M]. Beijing: Science Press, 2016:1-601.
- [34] 刘秀明, 罗祎. 粒度分析在沉积物研究中的应用[J]. 实验技术与管理, 2013, 30(8):20-23.
- Liu Xiuming, Luo Yi. Application of grain size analysis in sediments research [J]. Experimental Technology and Management, 2013, 30(8):20-23.
- [35] 孙千里, 周杰, 肖举乐. 岱海沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1):93-95.
- Sun Qianli, Zhou Jie, Xiao Jule. Grain-size characteristics of Lake Daihai sediments and its paleo-environment significance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(1):93-95.
- [36] 李文漪, 姚祖驹. 表土中松属花粉与植物间数量关系的研究[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 1990, (12):943-950.
- Li Wenyi, Yao Zujun. A study on the quantitative relationship between *Pinus* pollen in surface sample and *Pinus* vegetation [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 1990, (12):943-950.
- [37] 李月丛, 许清海, 肖举乐, 等. 中国北方森林植被主要表土花粉类型对植被的指示性[J]. 第四纪研究, 2005, 25(5):598-608.
- Li Yuecong, Xu Qinghai, Xiao Jule, et al. Indication of some major pollen taxa in surface samples to their parent plants of forest in Northern China [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(5):598-608.
- [38] 许清海, 李月丛, 阳小兰, 等. 中国北方几种主要花粉类型与植被定量关系[J]. 中国科学(D辑), 2007, 37(2):192-205.
- Xu Qinghai, Li Yuecong, Yang Xiaolan, et al. Quantitative relationship between several major pollen types and vegetation in North China [J]. Science in China (Series D), 2007, 37(2):192-205.
- [39] 郭超, 马玉贞, 刘杰瑞, 等. 过去2000年来西藏羊卓雍错沉积物粒度记录的气候变化[J]. 第四纪研究, 2016, 36(2):405-419.
- Guo Chao, Ma Yuzhen, Liu Jierui, et al. Climatic change recorded by grain size in the past about 2000 years from Yanzhog Yumco Lake, Tibet [J]. Quaternary Sciences, 2016, 36(2):405-419.
- [40] 聂军胜, 李曼. 柴达木盆地晚中新世河湖相沉积物粒度组成及其古环境意义[J]. 第四纪研究, 2017, 37(5):1017-1026.
- Nie Junsheng, Li Man. A grain size study on Late Miocene Huaitoutala section, NE Qaidam Basin, and its implications for Asian monsoon evolution [J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(5):1017-1026.
- [41] 韩鹏, 刘兴起. 内蒙古中东部查干淖尔湖流域7000年以来的气候演变[J]. 第四纪研究, 2017, 37(6):1381-1390.
- Han Peng, Liu Xingqi. The climate evolution inferred from Chagan-Nuur in middle-east part of Inner Mongolia since the last 7000 years [J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(6):1381-1390.
- [42] 迟振卿, 闵隆瑞, 王志明, 等. 河北省阳原盆地井儿洼钻孔磁化率、粒度反映的环境意义[J]. 地质力学学报, 2002, 8(1):87-96.
- Chi Zhenqing, Min Longrui, Wang Zhiming, et al. Environmental significance of magnetic susceptibility and grain size in Jingerwa core, Yangyuan Basin [J]. Journal of Geomechanics, 2002, 8(1):87-96.
- [43] 杨小强, 李华梅. 泥河湾盆地沉积物粒度组分与磁化率变化相关性研究[J]. 沉积学报, 2002, 20(4):675-679.
- Yang Xiaoqiang, Li Huamei. The correlation between the content of the different grain size and magnetic susceptibility in lacustrine sediments, Nihewan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4):675-679.
- [44] 裴树文, 李潇雨, 刘德成, 等. 泥河湾盆地东谷坨遗址古人类生存环境探讨[J]. 科学通报, 2009, 54(19):2895-2901.
- Pei Shuwen, Li Xiaoli, Liu Decheng, et al. Preliminary study on the living environment of hominids at the Donggutuo site, Nihewan Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(19):3896-3904.
- [45] 潘安定, 陈碧珊. 柴达木盆地尕斯库勒湖晚第四纪古环境[M]. 北京: 气象出版社, 2010:1-137.
- Pan Anding, Chen Bishan. Late Quaternary Paleoenvironment of Gahai Lake in Qaidam Basin [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2010:1-137.
- [46] 李超, 杨石岭, 李阳阳, 等. 河南卢氏盆地张家村组粒度特征与沉积环境研究[J]. 第四纪研究, 2016, 36(6):1428-1435.
- Li Chao, Yang Shiling, Li Yangyang, et al. Grain size characteristics and sedimentary environment of the Zhangjiacun formation in the Lushi basin, Henan Province [J]. Quaternary Sciences, 2016, 36(6):1428-1435.
- [47] 夏正楷. 泥河湾盆地的水下黄土堆积及其古气候意义[J]. 地理学报, 1992, 47(1):58-65.
- Xia Zhengkai. Underwater loess and paleoclimate [J]. Acta Geographica Sinica, 1992, 47(1):58-65.
- [48] 李小强, 鹿化煜, 李承森, 等. 山西榆社-太谷盆地上新世中晚期的植被与环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(1):103-108.
- Li Xiaoqiang, Lu Huayu, Li Chengsen, et al. Paleovegetation and paleoenvironment in Middle-Late Pliocene Yushe and Taigu basins, eastern Shanxi, China [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(1):103-108.
- [49] 郑卓, 张潇, 满美玲, 等. 中国及邻区利用孢粉进行古气候定量重建的回顾与数据集成[J]. 第四纪研究, 2016, 36(3):503-519.
- Zheng Zhuo, Zhang Xiao, Man Meiling, et al. Review and data integration of pollen-based quantitative paleoclimate reconstruction studies in China and adjacent areas [J]. Quaternary Sciences, 2016, 36(3):503-519.
- [50] 穆会双, 许清海, 张生瑞, 等. 孢粉资料定量重建泥河湾盆地侯家窑遗址时期的古气候[J]. 第四纪研究, 2015, 35(3):698-711.
- Mu Huihuang, Xu Qinghai, Zhang Shengrui, et al. Pollen-based quantitative reconstruction of the paleoclimate during the formation process of Houjiayao relic site in Nihewan Basin of China [J]. Quaternary Sciences, 2015, 35(3):698-711.
- [51] 袁宝印, 同号文, 温锐林, 等. 泥河湾古湖的形成机制及其与早期古人类生存环境的关系[J]. 地质力学学报, 2009, 15(1):77-87.
- Yuan Baoyin, Tong Haowen, Wen Ruilin, et al. The formation mechanism of the Nihewan paleo-lake and its relationship with living environment for early ancient human [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15(1):77-87.
- [52] 王开发. 孢粉学概论[M]. 北京: 北京大学出版社, 1983:1-205.

- Wang Kaifa. Theory of Pollen Analysis [M]. Beijing: Peking University Press, 1983:1-205.
- [53] 童国榜, 陈亮, 龙江平, 等. 北部湾东部表层孢粉沉积特征及其沉积动力环境[J]. 科学通报, 2012, 57(9):743-752.  
Tong Guobang, Chen Liang, Long Jiangping, et al. Surface pollen distribution patterns in Beibu Gulf and corresponding sediment dynamics environment [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(9):902-911.
- [54] 许清海, 李曼玥, 张生瑞, 等. 中国第四纪花粉现代过程: 进展与问题[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(11):1661-1682.  
Xu Qinghai, Li Manyue, Zhang Shengrui, et al. Modern pollen processes of China: Progress and problems [J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 45(11):1661-1682.
- [55] 张光威, 杨子庚, 林和茂, 等. 泥河湾盆地晚上新世-早更新世时期沉积环境的划分[J]. 海洋地质动态, 1996, (2):1-4.  
Zhang Guangwei, Yang Zigeng, Lin Hemaoy, et al. Division of sedimentary environment during the Late Miocene-Early Pleistocene in the Nihewan Basin [J]. Marine Geological Dynamics, 1996, (2):1-4.
- [56] Lisiecki L E, Raymo M E. A Plio-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic delta  $^{18}\text{O}$  records [J]. Paleoceanography, 2005, 20(1):522-533.
- [57] Martínezgarcía A, Rosellmelé A, Mcclymont E L, et al. Subpolar link to the emergence of the modern equatorial Pacific cold tongue [J]. Science, 2010, 328(5985):1550.
- [58] Qin F, Ferguson D K, Zetter Retal. Late Pliocene vegetation and climate of Zhangcun region, Shanxi, North China [J]. Global Change Biology, 2011, 17(5):1850-1870.
- [59] 秦锋, Syabryaj S, 李晓花, 等. 运用 Grichuk 方法重建山西张村晚上新世古温度[J]. 第四纪研究, 2011, 31(4):636-642.  
Qin Feng, Syabryaj S, Li Xiaohua, et al. Reconstruction on the temperature parameters the Late Pliocene Zhangcun, Shanxi, using MG [J]. Quaternary Sciences, 2011, 31(4):636-642.
- [60] 李杏茹, 方小敏, 吴福莉, 等. 黄土高原北部保德孢粉记录及早上新世夏季风强盛[J]. 科学通报, 2010, 55(35):3397-3402.  
Li Xingru, Fang Xiaomin, Wu Fuli, et al. Pollen evidence from Baode of the northern Loess Plateau of China and strong east Asian summer monsoons during the Early Pliocene [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(35):3397-3402.
- [61] 王伟铭, 李经荣, 王京东, 等. 山东章丘上新世巴漏河组 and 更新统孢粉植物群[J]. 古生物学报, 2002, 41(1):72-76.  
Wang Weiming, Li Jingrong, Wang Jingdong, et al. Palynofloras from Pliocene Balouhe Formation and Pleistocene in Zhangqiu County, Shandong Province [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2002, 41(1):72-76.
- [62] 王伟铭, 张大华. 内蒙古商都-化德盆地第三纪孢粉组合——兼论中国草原植被的形成[J]. 微体古生物学报, 1990, 7(3):239-252.  
Wang Weiming, Zhang Dahua. Tertiary sporo-pollen assemblages from the Shangdu-Huade basin, Inner Mongolia with discussion on the formation of steppe vegetation in China [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 1990, 7(3):239-252.
- [63] Yang S, Ding Z. Drastic climatic shift at ~2.8 Ma as recorded in eolian deposits of China and its implications for redefining the Pliocene-Pleistocene boundary [J]. Quaternary International, 2010, 219(1):37-44.
- [64] Kleiven H F, Jansen E, Fronval T, et al. Intensification of Northern Hemisphere glaciations in the circum Atlantic region (3.5-2.4 Ma) ice-rafted detritus evidence [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2002, 184(3):213-223.
- [65] Venti N L, Billups K. Stable-isotope stratigraphy of the Pliocene-Pleistocene climate transition in the northwestern subtropical Pacific [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2012, 326-328:54-65.
- [66] Emiliani C. Oxygen isotopic analysis of the size fraction between 62 and 250 micrometers in Caribbean cores p6304-8 and p6304-9 [J]. Science, 1977, 198(4323):1255.
- [67] 刘佳. 晚新生代天水盆地孢粉记录的气候变化与青藏高原隆升[D]. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2016:90.  
Liu Jia. Late Cenozoic Climate Change and Uplift of the Tibetan Plateau—Palynological Evidence from the Tianshui Basin [D]. Lanzhou: The Doctoral Thesis of Lanzhou University, 2016:90.
- [68] 方小敏, 吴福莉, 韩文霞, 等. 上新世-第四纪亚洲内陆干旱化过程——柴达木中部鸭湖剖面孢粉和盐类化学指标证据[J]. 第四纪研究, 2008, 28(5):874-882.  
Fang Xiaomin, Wu Fuli, Han Wenxia, et al. Plio-Pleistocene drying process of Asian inland—Sporopollen and salinity records from Yahu section in the central Qaidam Basin [J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(5):847-882.
- [69] Haley B A, Frank M, Spielhagen R F, et al. Influence of brine formation on Arctic Ocean circulation over the past 15 million years [J]. Nature Geoscience, 2007, 1(1):68-72.
- [70] Stipp J J, Chappell J M A, Mcdougall I, et al. K/Ar age estimate of the Pliocene-Pleistocene boundary in New Zealand [J]. American Journal of Science, 1967, 265(6):462-474.
- [71] Shackleton N J, Backman J, Zimmerman H, et al. Oxygen isotope calibration of the onset of ice-rafting and history of glaciation in the North Atlantic [J]. Nature, 1984, 307(5952):620-623.
- [72] 孙东怀, 陈明扬, John Shaw, 等. 晚新生代黄土高原风尘堆积序列的磁性层年代与古气候记录[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(1):79-84.  
Sun Donghuai, Chen Mingyang, Shaw John, et al. Magnetostratigraphy and paleoclimate records of aeolian accumulation in the Late Cenozoic Loess Plateau [J]. Science in China (Series D), 1998, 28(1):79-84.
- [73] 丁仲礼, 孙继敏, 刘东生. 联系沙漠-黄土演变过程中耦合关系的沉积学指标[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(1):82-87.  
Ding Zhongli, Sun Jimin, Liu Tungsheng. Sedimentology of the coupling relationship between desert and loess evolution [J]. Science in China (Series D), 1999, 29(1):82-87.
- [74] Guo Z, Peng S, Hao Q, et al. Late Miocene-Pliocene development of Asian aridification as recorded in the red-earth formation in Northern China [J]. Global and Planetary Change, 2004, 41(3):135-145.
- [75] 黄宝琦, 成鑫荣, 翦知潜, 等. 晚上新世以来南海北部上部水体结构变化及东亚季风演化[J]. 第四纪研究, 2004, 24(1):110-115.  
Huang Baoqi, Cheng Xinrong, Jian Zhimin, et al. Variations in upper ocean structure in the South China Sea and the evolution of the East Asian monsoons since Late Pliocene [J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(1):110-115.
- [76] 马文涛, 田军, 李前裕. 晚上新世赤道太平洋气候转型和北极冰盖扩张的轨道驱动[J]. 科学通报, 2009, 54(22):3537-3545.  
Ma Wentao, Tian Jun, Li Qianyu. Astronomically modulated Late Pliocene equatorial Pacific climate transition and northern hemisphere ice sheet expansion [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(22):3537-3545.

## LATE PLIOCENE PALYNOLOGICAL RECORDS OF VEGETATION AND CLIMATE CHANGES IN THE NIHEWAN BASIN

Ding Guoqiang<sup>1,2</sup>, Shen Gaihui<sup>1,2</sup>, Li Yuecong<sup>1,2</sup>, Wang Yong<sup>3</sup>, Chi Zhenqing<sup>3</sup>, Li Bing<sup>1,2</sup>, Yang Xiaolan<sup>4,5</sup>

(1. College of Resource and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, Hebei; 2. Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Development of Hebei Province, Shijiazhuang 050024, Hebei; 3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037; 4. Institute of Geography Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, Hebei; 5. Hebei Engineering Research Center for Geographic Information Application, Shijiazhuang 050011, Hebei)

### Abstract

The lacustrine and fluvial sediments in the Nihewan Basin from Late Pliocene to Late Pleistocene contain rich pollen and spore grains, which can be used to reconstruct past climate changes. Sediment samples are collected in the NHA borehole at Haojiatai, eastern part of the Nihewan Basin, Yangyuan County, Hebei Province. The drilling coordinates are 40°13'0.4"N, 114°38'32.3"E and 938 m a.s.l. The total sampling depth is 365.82 m. The samples were taken from the top of the Pliocene, 19.2 m in thickness and 15600~17520 cm in depth. One sample was collected every 20 cm for the core of this section, and a total of 97 samples were obtained. In this study, Haojiatai NHA drilling core in the Nihewan Basin was selected to discuss the characteristics of vegetation and climate changes in Late Pliocene based on the pollen and grain size analysis of 97 samples. According to the existing paleomagnetic and stratigraphic contrast, the age of the sampling strata is from 2.92 Ma to 2.56 Ma. Based on pollen and grain size analysis, 4 stages with different climate and vegetation can be divided: Stage 1 (2.92~2.82 Ma), the broad-leaved trees had the highest percentage in the full section with about 13%. *Pinus* pollen content was more than 30% and *Picea* were less than 20% in most samples and *Artemisia* and Chenopodiaceae were 10%~20%. This indicates that broad-leaved forest and pine forest should be the main vegetation type in the sampling point, with some spruce forest existing in the mountainous regions, and that the climate was relatively warm and humid. Stage 2 (2.82~2.71 Ma), the pollen percentages of *Picea*, *Artemisia* and Chenopodiaceae increased significantly, with the maximum of 90% for *Picea* and 80% for *Artemisia* and Chenopodiaceae; on the contrary, the pollen percentages of *Pinus* and broad leaved trees significantly reduced to lower than 10% and 5% separately; which indicates that during this period, the surrounding vegetation became *Picea* forest or steppe and the climate tended to become chilly with severe fluctuation of humidity. Stage 3 (2.71~2.66 Ma), *Pinus* pollen percentages increased significantly, with more than 40% in most samples. The percentage of fern spore was about 11%, reaching the highest in the whole section; instead, *Picea* percentage decreased obviously, with less than 30% in most samples, and broad-leaved trees pollen was rare and the percentage of *Artemisia* and Chenopodiaceae was less than 10%, indicating that the surrounding vegetation was dominated by pine forests, and the spruce forest retreated to the mountainous regions, and the climate became relatively warm and wet, but the rareness of broad-leaved pollen indicates that the degree of warmth is lower than that in Stage 1. Stage 4 (2.66~2.56 Ma), *Picea* became the dominated pollen type with more than 80% percentage in most samples, and *Pinus* was reduced to less than 10% and broad-leaved forest pollen grains were rarely be recorded suggesting that *Picea* forest expanded to the nearby of sampling site and the climate was getting much colder and connected to the Pleistocene glacial period. According to the pollen analysis, there are two relative warm periods (2.92~2.82 Ma and 2.71~2.66 Ma) and two cold periods in the Late Pliocene (2.82~2.71 Ma and 2.66~2.56 Ma) respectively. The stages with high *Picea* pollen percentage, had good correspondence with the deep-sea oxygen isotopes periods of MIS 102, MIS 104, G2, G6 and G10, which represents the cold climate.

**Key words:** Nihewan Basin; Late Pliocene; palynological analysis; vegetation; climate change