

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.575



宁晋泊晚更新世以来气候变化的正构烷烃分子记录

杨桂芳¹, 陈正洪², 张慧娟¹, 贾 晴¹

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

摘要: 华北地区晚更新世以来气候变化研究具有重要的意义. 选择宁晋泊地区开展河湖相沉积物的分子化石研究. 结果表明, 沉积物中正构烷烃碳数分布范围为 $C_{15} \sim C_{33}$, 高碳数奇碳优势明显, 多以 C_{29} 和 C_{31} 为主峰的单峰分布, 少量样品出现以 C_{17} 为次主峰的双峰分布, 表明有机质以陆生植物和大型水生植物为主. 结合正构烷烃参数, 分析了宁晋泊地区晚更新世以来的气候演变过程, 展现了“83~68 ka 气候较为温和, 湖泊水位较低; 68~30 ka 气候暖湿, 湖泊扩张; 30~22 ka 气候冷干, 湖泊萎缩; 22~10 ka 气候好转, 湖泊水位上升; 全新世气候温和适度, 湖泊水位略有降低”的特征. 区域对比分析表明, 末次冰期以来宁晋泊地区与延庆盆地等地的气候变化基本一致, 具有冰期—间冰期旋回特征, 说明其主要受太阳辐射的控制.

关键词: 正构烷烃; 气候指示意义; 古植被; 古气候波动; 宁晋泊地区; 气候变化.

中图分类号: P534.63

文章编号: 1000-2383(2018)11-4001-07

收稿日期: 2018-02-28

Paleoclimatic Variations in Ningjinpo Area since Late Pleistocene as Indicated by *n*-Alkanes

Yang Guifang¹, Chen Zhenghong², Zhang Huijuan¹, Jia Qing¹

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Training Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract: It is of importance to reconstruct the paleoclimatic variations since late Pleistocene in North China. In this paper, it selected Ningjinpo area to characterize the paleoclimatic oscillations with the aid of microbial lipids. Results indicate that the carbon number distributions of most samples ranged from C_{15} to C_{33} , with the dominance of high carbon (C_{29} and C_{31} in particular) in most samples and some lower homologue as secondary peak (C_{17} for instance), suggesting the mixed origin from higher plants and aquatic organisms. According to the parameters derived from *n*-alkanes, alternative paleoclimatic conditions of the study area from warm climate with low lake level (83–68 ka), hot-wet period with lake expansion (68–30 ka), cold-dry duration with shrinking lake (30–22 ka), hot and wet climate with increasing lake level (22–10 ka), to moderate climate period (10–0 ka) were reconstructed since late Pleistocene. Regional comparison demonstrated the similar glacial-interglacial paleoclimatic patterns occurred in Ningjinpo area and Yanqing basin, potentially suggesting the principal control of solar radiation.

Key words: *n*-alkane; climatic implication; paleovegetation; paleoclimatic variation; Ningjinpo area; climate change.

河北平原晚第四纪以来广泛发育了河湖相沉积, 是研究第四纪地层和古气候变迁的理想地区(王

成敏和郭盛乔, 2005; 郭盛乔等, 2005). 然而长久以来由于分辨率低及测年等, 河北平原晚更新世以来

基金项目: 北京市自然科学基金委项目(No. 8162038); 中央高校经费基本科研业务项目(Nos. 2652017216, 2652017285).

作者简介: 杨桂芳(1975—), 教授, 博士生导师, 长期从事全球变化与地貌演变的教学与科研工作. ORCID: 0000-0002-2397-5746.

E-mail: yangguifang@126.com

引用格式: 杨桂芳, 陈正洪, 张慧娟, 等, 2018. 宁晋泊晚更新世以来气候变化的正构烷烃分子记录. 地球科学, 43(11): 4001–4007.

气候变化研究尚且薄弱,一些千百年尺度的古气候事件是否具有代表性仍值得商榷,晚冰期—全新世转换特征的研究也缺乏清晰的线索(赵英时,1987;林景星等,1998)。特别是在全球变化背景下,传统的孢粉、碳酸钙含量等指标难以揭示气候变化与地表生态转变的耦合关系,因此如何查明陆地生态系统变化(特别是微生物的分布),重建末次冰期以来高分辨率的气候变迁过程并将其与地表生态演化相联系意义重大。

正构烷烃具有分子结构简单、化学性质稳定的特性,由于分子水平忠实记录有机质的相对含量变化及其沉积环境变化,因而被广泛应用于古植被、古生态和古环境研究(Xie *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2007; Ouyang *et al.*, 2015)。随着一些特殊类脂分子及有关参数,如碳优势指数 CPI(Eglinton and Eglinton, 2008)、长链正构烷烃平均链长 ACL(Dodd and Poveda, 2003)、Paq 指数(Ficken *et al.*, 2000)在雪冰、黄土、红土等全球变化关键载体的成功应用,显示了其对全球变化和地表生态过程的良好指示意义(Xie *et al.*, 2004; Eglinton and Eglinton, 2008; Pu *et al.*, 2017; Shen *et al.*, 2017)。近年来的研究表明,正构烷烃单体碳同位素可准确识别陆生高等植物组成及反演气候环境变化(Huang *et al.*, 2001; Seki *et al.*, 2010),而单体氢同位素可定量重建温度、湿度、大气降水同位素的变化(Sachse *et al.*, 2004; Guenther *et al.*, 2013)。低碳数与高碳数链长比值(C_{15-21}/C_{22-33} , L/H)反映低等菌藻类生物与高等植物的相对变化(Wang *et al.*, 2007),较高的 L/H 值指示以低等菌藻类生物贡献为主,反之较低的 L/H 值则指示高等植物贡献为主(Cranwell *et al.*, 1987)。陆生与水生植物比值($\sum C_{27+20+31}/\sum C_{15+17+19}$, TAR)能反映水陆贡献相对比例,其值越大表明陆生植物贡献越多(Bianchi and Canuel, 2011)。鉴于此,本文拟对河北平原核心区——宁晋泊典型沉积剖面开展正构烷烃的分布特征研究,旨在为华北地区晚更新世以来的气候波动及其地表生态过程提供重要基础资料。

1 材料和方法

宁晋泊地区($37^{\circ}00' \sim 37^{\circ}30' N$, $114^{\circ}40' \sim 115^{\circ}15' E$)位于河北平原南部邢台市宁晋、隆尧、巨鹿之间(图 1)。古时与任县的南泊以澧河、滏阳河相连,合称为大陆泽。研究区属于暖温带半湿润季风气

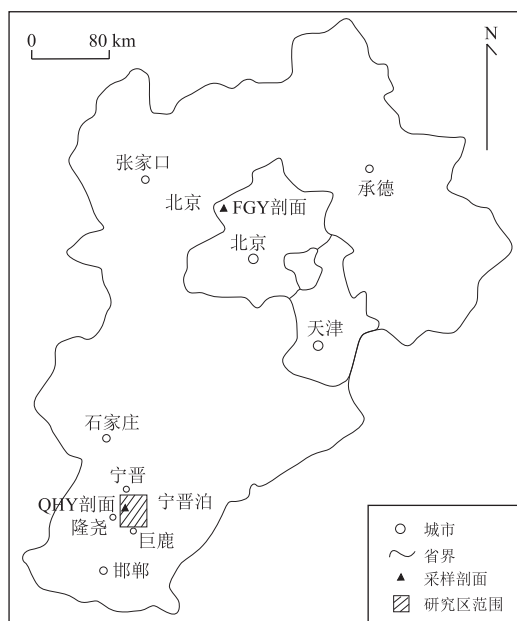


图 1 宁晋泊地理位置简图

Fig.1 Sketch map showing the location of Ningjinpo area

候区,年均温度在 $12 \sim 13^{\circ}C$ 之间,年均降水量 500 mm 左右。沉积剖面位于隆尧县千户营,厚度约 20 m,岩性为典型的河湖相沉积物,主要为棕色、黄色粉砂质粘土和粘土质粉砂互层,含有少量的钙质结核,具有水平层理,剖面上部可见植物根系。以 20 cm 的间距在剖面深度 11 m 处以上采集样品 56 个,并迅速冷冻保存。

样品干燥后粉碎至 100 目,然后在索氏抽提器中用二氯甲烷反复抽提 72 h,在旋转蒸发器上进行减压浓缩至 5~10 mL,并用硅胶色层柱进行组分分离,分别用正己烷、苯或无水甲醇作为冲洗剂,得到饱和烃、芳烃和非烃。有机组分分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。实验所用的气相色谱仪是岛津 GC2010。色谱条件:Rtx-5 石英毛细管柱($30 m \times 0.25 mm \times 0.25 \mu m$),始温 $70^{\circ}C$,以 $10^{\circ}C/min$ 速率升至 $210^{\circ}C$,最后以 $3^{\circ}C/min$ 速率达到终温 $300^{\circ}C$,终温恒温 25 min,进样口温度 $300^{\circ}C$,进样量 $1 \mu L$,He 为载气,FID 检测器 $320^{\circ}C$,不分流模式, H_2 流速为 $40.0 mL/min$,空气流速为 $100.0 mL/min$, N_2/Air 补偿流速为 $30.0 mL/min$ 。

2 指标解译与年代模式

2.1 正构烷烃分布特征

通过 GC-MS 测试,全部样品中均测得丰富的

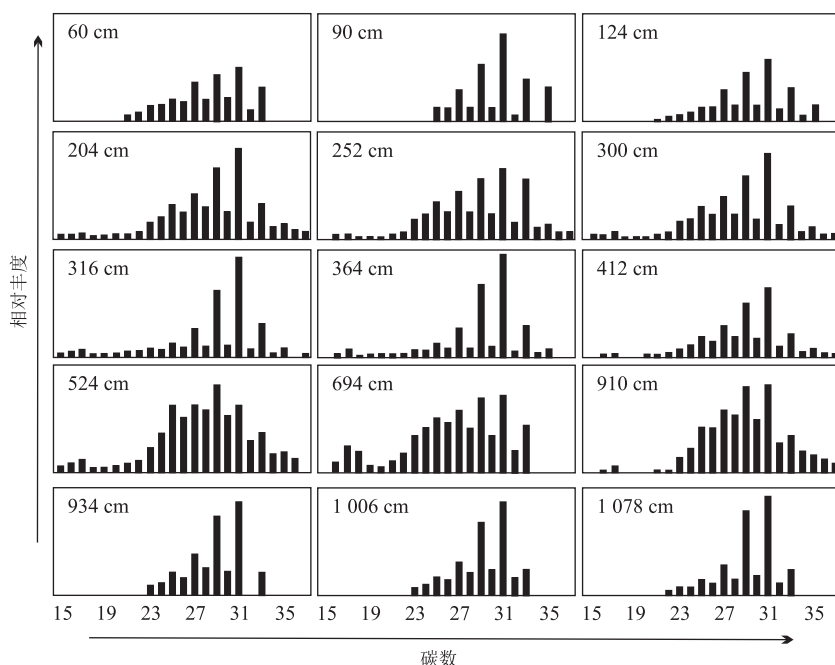


图 2 宁晋泊千户营剖面部分样品正构烷烃分布特征

Fig.2 Distribution patterns of *n*-alkanes in typical samples from Qianhuaying profile in Ningjinpo area

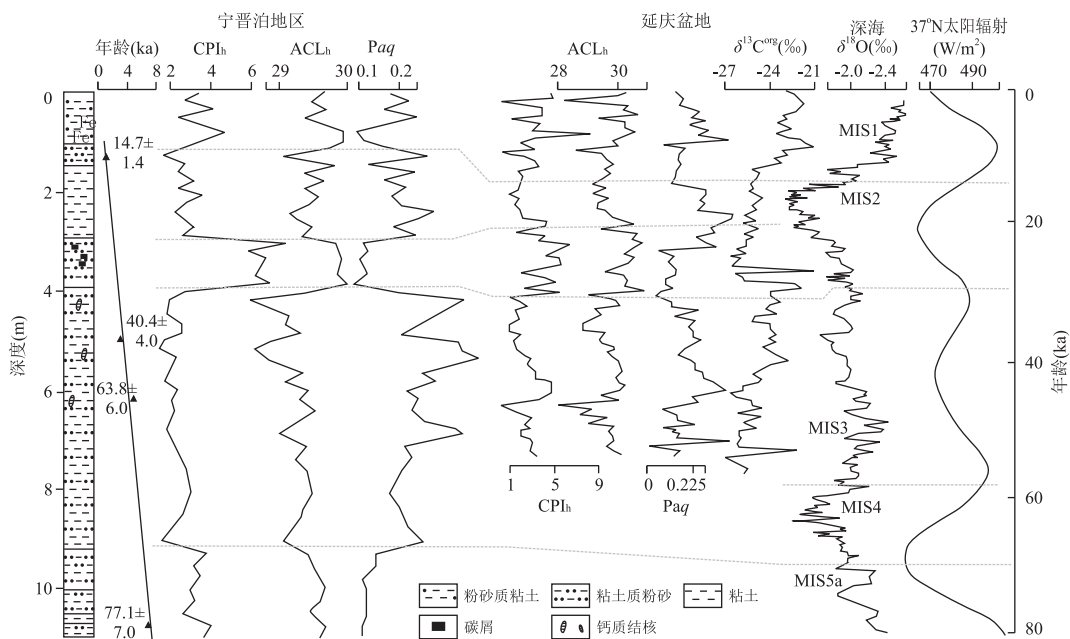


图 3 千户营剖面正构烷烃参数与延庆盆地、太阳辐射量变化及深海氧同位素对比

Fig.3 Distribution of *n*-alkanes from Qianhuaying profile in Ningjinpo area in comparison with results from Yanqing basin, summer solar radiation, and oxygen isotope record in the Sulu Sea

据 Linsley(1996)

类脂物,碳数分布范围主要在 $C_{15} \sim C_{33}$ 之间,其中部分样品测得少量的 $C_{34} \sim C_{37}$,整体呈高碳数为主的单峰分布特征,单峰态的主峰碳为 C_{31} 或 C_{29} ,少量样品出现以 C_{17} 为次主峰的双峰分布(例如深度 9.2~4.0 m,图 2)。高碳数正构烷烃($C_n \geq C_{22}$)相对

丰度占总正构烷烃的 80% 以上,呈现出明显的奇碳优势; C_{22} 以下的正构烷烃含量甚少,无明显的奇偶优势。CPI 值的范围在 2.83~15.83 之间,均值为 6.22,沉积柱自下而上表现为“高一低一高一低一高”的变化趋势(图 3)。正构烷烃 ACL 均值为 29.42,

变化范围在 28.57~30.02 之间,变化趋势与 CPI 大致相似(图 3)。Paq 值在 0.08~0.43 之间波动,均值为 0.21,且与 ACL 值呈明显负相关关系,即表现为“低—高—低—高—低”的变化趋势(图 3)。

2.2 正构烷烃来源分析

湖泊沉积物中短链($C_{15} + C_{17} + C_{19}$)、中链($C_{21} + C_{23} + C_{25}$)和长链($C_{27} + C_{29} + C_{31}$)正构烷烃分别来源于低等生物、大型水生生物和陆生高等生物(Meyers and Ishewatari, 1993)。其中,中链正构烷烃含量可反映湖水位的变化,进而指示区域降水量或相对湿度(Lin *et al.*, 2008),而长链正构烷烃含量主要反映了区域降水量控制下的陆生高等植物总量的变化(Meyers and Ishewatari, 1993; 杨桂芳等, 2015)。因此,可根据沉积物中正构烷烃的碳数分布特征或主峰碳数判断有机质来源。在宁晋泊地区,大部分样品呈以高碳数为主的单峰分布特征,少量样品出现以 C_{17} 为次主峰的双峰分布,表明植被类型以陆生高等植物和大型水生植物为主的特征,这与以往的孢粉分析结果一致(郭盛乔等, 2005)。

研究显示,河湖相沉积物中碳优势指数 CPI_h 值主要是由气候控制下的生物降解作用导致,具体计算见公式(1)。气候寒冷干燥时生物降解作用减慢, CPI_h 值较高;反之 CPI_h 值较低(Yamada and Ishewatari, 1999; Xie *et al.*, 2004)。Paq 指数用来判断沉水/漂浮植物与挺水植物以及陆生植物相对量的大小(Ficken *et al.*, 2000),具体计算见公式(2)。后来,Paq 指数常用来评估湖泊水位、湖泊和泥炭沉积物中水分丰度以及区域气候的变化。一般来说,Paq 值降低表明沉积物中陆生高等植物或挺水植物贡献越大,气候相对干燥,指示湖泊水面收缩,水位较低;反之,则沉水和漂浮大型植物贡献较高,水位高(Zhou *et al.*, 2010; Pu *et al.*, 2017)。长链正构烷烃平均链长 ACL_h 是指沉积物中各链长(≥ 25)正构烷烃相对丰度的加权平均值,其气候指示意义较为复杂,具体计算见公式(3)。但从根本上讲,植物表皮蜡质组分最主要的功能是维持叶片用水平衡,在降水量较少或蒸腾较强的地区,植物会产生较长碳链的叶蜡物质以发挥其锁水功能。因此, ACL_h 可用于指示有效湿度, ACL_h 较长时指示区域干旱少雨,反之则指示降雨量增加(王素萍等, 2010; 杨桂芳等, 2015)。且在研究区 ACL_h 值与 CPI_h 值明显正相关($R^2 = 0.58$),而与 Paq 呈负相关关系($R^2 = 0.85$),因此宁晋泊地区 ACL_h 较高时指示了气候干冷,陆源植物输入增加,为湖泊萎缩期; ACL_h 较低时则为

暖湿气候,湖泊扩张。

$$CPI_h = \frac{C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}}{2 \times (C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32})} + \frac{C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}}{2 \times (C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34})}, \quad (1)$$

$$Paq = \frac{C_{23} + C_{25}}{C_{23} + C_{25} + C_{29} + C_{31}}, \quad (2)$$

$$ACL_h = \frac{25 \times C_{25} + 27 \times C_{27} + 29 \times C_{29} + 31 \times C_{31} + 33 \times C_{33}}{C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}}. \quad (3)$$

综上,千户营剖面正构烷烃碳分子组成指数反映了正构烷烃各组分的相对含量随着深度(年代)的变化而变化。下部层位(深度 11.2~9.2 m), Paq 均值为 0.11, ACL_h 均值为 29.56, CPI_h 均值为 3.40,表明沉积物中有机质主要来源于陆源高等植物和少量大型水生植物。中下部层位(深度 9.2~4.0 m)正构烷烃参数 CPI_h 和 ACL_h 处于低值区(均值为 2.17 和 29.17),而 Paq 处于高值区(均值为 0.27),部分样品出现了 C_{17} 为次主峰的双峰分布;深度 4.0~3.0 m, CPI_h 和 ACL_h 值明显升高,而 Paq 值降低,来源于陆源高等植物的贡献明显增加,大型水生植物的比例也略有减少;深度 3.0~1.3 m, 较低 CPI_h 和 ACL_h 值以及较高的 Paq 值表明,陆生高等植物有所减少,有机质主要来源于大型水生生物和少量的低等菌藻类。深度 1.3 m 以上, CPI_h 和 ACL_h 值略有增加而 Paq 略降低,中链和短链的正构烷烃相对含量减少,显示了主要来源于陆生高等植物的贡献。

2.3 年代模式

对在剖面 1.30 m、4.90 m、6.14 m 和 10.72 m 处采集的样品进行了 ESR 年代学分析。取一定量的原样品放入干燥箱中低温 40 °C 烘干,选出粒径为 0.200~0.125 mm 粒度的组分,测定 γ 及 α 天然放射性,得到铀当量含量及钾含量;制取 5 份 0.20~0.30 mm 粒度石英样品(或碳酸钙),在 300、600、900 Gy 吸收剂量下,样品冷却 5~7 d,然后用德国 ER-200D-SRC 型电子自旋共振谱仪进行测定,测试误差 $< 1\%$ 。阜高营剖面自上而下的年代结果分别为 14.7 ± 1.4 ka、 40.4 ± 4.0 ka、 63.8 ± 6.0 ka、 77.1 ± 7.0 ka。计算表明,年代与深度呈现很好的线性拟合关系($R^2 = 0.91$),沉积速率可达 13.2 cm/ka,揭示了末次冰期以来连续完整的沉积历史(图 3)。

3 古气候演化特征

根据宁晋泊地区千户营河湖相沉积剖面的 CPI_h 、 ACL_h 和 Paq 值, 可将研究区晚更新世以来的古气候演化阶段和主要特征分析如下(图 3):

(1) 83~68 ka(深度 11.0~9.2 m), 较高的 CPI_h 和 ACL_h 值以及较低的 Paq 值反映了研究区有机质主要来源于陆源高等植物和少量大型水生生物, 气候较为温和, 湖泊水位较低, 同时有机碳同位素略偏正(均值为 -23.21%), 而孢粉主要以针阔叶混交林—疏树草原植被为主, 也反映了类似的气候特征(赵英时, 1987)。

(2) 68~30 ka(深度 9.2~4.0 m), CPI_h 和 ACL_h 值都迅速降低, 而 Paq 值明显升高, 表明气候变暖湿, 湖泊处于扩张阶段。已有结果也显示该阶段有机碳同位素值略偏负(均值为 -23.33%), 植被主要以落叶阔叶林—草原植被为主, 表明气候相对温暖, 湿度也有所增加(吴忱, 1992)。值得注意的是, 该阶段沉积速率较快, 且潮湿的气候更适宜于陆生植物的生长, 因此利用 Paq 等指标进行分析时要特别小心。该阶段较高的 Paq 极有可能与有机质的保存有关。暖期时, 湖水淡化, 水中溶解大气 CO_2 含量增大, 陆源有机质进入湖泊会被一些浮游动物及细菌分解, 导致 Paq 值相对偏高。

(3) 30~22 ka(深度 4.0~3.0 m), CPI_h 和 ACL_h 值为高值区, Paq 值为低值区, 可能来自陆源高等植物和挺水植物的贡献明显增加, 指示气候转冷干, 湖泊明显萎缩。综合特征显示, 该阶段气候开始迅速降温, 植被以荒漠草原植被为主, 气候环境恶化, 对应于末次盛冰期。以往的孢粉研究也显示, 该时期华北平原出现了大量的以云杉、冷杉林以及蒿、藜科、禾本科为主的草原植被, 当时气候极其干冷(赵英时, 1987; 吴忱, 1992)。

(4) 22~10 ka(深度 3.0~1.3 m), 该阶段 CPI_h 和 ACL_h 值明显降低, Paq 值略有增加, 指示了陆生高等植物有所减少, 而来源于大型水生生物的贡献增加, 该阶段气候变得暖湿, 可能是随着冰消期的到来, 气候开始转暖, 湖泊水位有所上升。

(5) 10 ka 至今(深度 1.3~0 m), CPI_h 和 ACL_h 值开始增加, 而 Paq 值略降低, 表明沉积物中有机质主要来源于陆生高等植物, 随着全新世的到来, 气候变得温和适度。而偏高的有机碳同位素(均值为 -22.92%)和疏树草原植被也证实了这一点(赵英时, 1987; 吴忱, 1992)。

区域对比分析表明, 宁晋泊地区正构烷烃参数 CPI_h 、 ACL_h 和 Paq 值共同记录的气候变化与延庆盆地阜高营剖面(FGY 剖面, 见图 1)的正构烷烃记录具有很好的一致性, 显示了相似的气候变化过程(张慧娟等, 2017, 2018; 图 3)。例如, 两地都经历了“气候温湿—末次冰盛期冷干—末次冰消期转暖—全新世气候偏温”的气候转变过程, 且与同纬度夏季太阳辐射和华北地区的气候变化大背景基本一致(赵英时, 1987), 表明了华北地区末次冰期以来气候变化过程主要受到太阳辐射控制, 因而冰期—间冰期旋回特征明显。但不同的是, 宁晋泊地区全新世以来气候温和适度, 而北京延庆盆地降雨量明显降低, 气候偏干, 这与该时期同纬度较低的太阳辐射不太符合(图 3)。这可能一方面是由于宁晋泊地区相对开阔且纬度较高, 而延庆盆地相对封闭且接受较少的太阳辐射, 来自西北部的强西伯利亚冷高压很容易深入延庆盆地内部且不容易扩散造成的, 同时也可能与区域水文、气候反馈效应及地形地貌等因素有关, 导致全新世以来延庆盆地降水较少。这种不一致性也表明, 华北地区全新世以来气候变化较为复杂, 不同地区会显示明显的差异性, 因此可能是未来高分辨率气候研究的重点之一。此外, 宁晋泊地区的气候变化与深海氧同位素(Linsley, 1996)变化也显示了良好的一致性, 例如 MIS1、MIS3 和 MIS5a 几个阶段的变化都是相似的。但宁晋泊地区 MIS2 略有不同, 宁晋泊地区气候略微超前, 进入 LGM 较早, 且冰消期气候较为暖湿, 这一方面可能是由于正构烷烃反映的是温度和湿度共同作用的结果, 另一方面可能与该地区的构造因素以及独特的水文格局有关。此外 MIS4 不是特别明显, 虽然沉积剖面正构烷烃参数也显示了气候略微偏干偏冷。这可能是由于时间分辨率还有待进一步提高, 也可能是由于宁晋泊地区海拔较低, 从而导致大气 CO_2 浓度以及尘埃含量变化微弱, 加上受洋流和西风带的影响较少, 所以气候变化幅度较小。

4 结论

根据典型沉积剖面的正构烷烃参数特征, 恢复了宁晋泊地区晚更新世以来气候变化的详细过程。全部样品中均测得丰富的类脂物, 碳数分布范围主要在 C_{15} ~ C_{33} 之间, 整体呈以高碳数(C_{29} 和 C_{31})为主的单峰分布特征, 少量样品出现以 C_{17} 为次主峰的双峰分布, 表明了沉积物有机质主要来源于陆生

高等植物和大型水生植物。根据正构烷烃分子组成指数(例如 CPI_h 、 ACL_h 和 Paq 值等),可将研究区气候变化划分为 5 个阶段:83~68 ka(深度 11.0~9.2 m),气候较为温干;68~30 ka(深度 9.2~4.0 m),气候暖湿,湖泊扩张;30~22 ka(深度 4.0~3.0 m),气候转冷干;22~10 ka(深度 3.0~1.3 m),气候好转;10 ka 至今(深度 1.3~0 m),全新世气候温和适度。区域对比分析表明,宁晋泊地区末次冰期以来气候变化主要受到太阳辐射控制,因而呈现冰期-间冰期旋回的特征,其与延庆盆地、华北地区和全球气候变化的大背景基本一致,而全新世以来气候变化具有一些特殊性。

致谢:正构烷烃的测定与分析得到了杨欢老师的指导,特在此表示感谢!同时衷心感谢两位审稿专家对本文提出的宝贵意见!

References

- Bianchi, T.S., Canuel, E.A., 2011. *Chemical Biomarkers in Aquatic Ecosystems*. Princeton University Press, Princeton.
- Cranwell, P. A., Eglinton, G., Robinson, N., 1987. Lipids of Aquatic Organisms as Potential Contributors to Lacustrine Sediments—II. *Organic Geochemistry*, 11 (6): 513–527. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(87\)90007-6](https://doi.org/10.1016/0146-6380(87)90007-6)
- Dodd, R. S., Poveda, M. M., 2003. Environmental Gradients and Population Divergence Contribute to Variation in Cuticular Wax Composition in *Juniperus Communis*. *Biochemical Systematics and Ecology*, 31 (11): 1257–1270. [https://doi.org/10.1016/s0305-1978\(03\)00031-0](https://doi.org/10.1016/s0305-1978(03)00031-0)
- Eglinton, T.I., Eglinton, G., 2008. Molecular Proxies for Paleoclimatology. *Earth and Planetary Science Letters*, 275 (1–2): 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.012>
- Ficken, K. J., Li, B., Swain, D. L., et al., 2000. An *n*-Alkane Proxy for the Sedimentary Input of Submerged/Floating Freshwater Aquatic Macrophytes. *Organic Geochemistry*, 31 (7–8): 745–749. [https://doi.org/10.1016/s0146-6380\(00\)00081-4](https://doi.org/10.1016/s0146-6380(00)00081-4)
- Guenther, F., Aichner, B., Siegwolf, R., et al., 2013. A Synthesis of Hydrogen Isotope Variability and Its Hydrological Significance at the Qinghai-Tibetan Plateau. *Quaternary International*, 313–314: 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.07.013>
- Guo, S.Q., Wang, S.M., Yang, L.J., 2005. Climatic and Environmental Change in North China Plain during the Last Glacial Maximum. *Geological Review*, 51 (4): 423–427 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Y., Street-Perrott, F. A., Metcalfe, S. E., et al., 2001. Interglacial Variations in C3 and C4 Plant Abundance. *Science*, 293 (5535): 1647–1651. <https://doi.org/10.1126/science.1060143>
- Lin, J.X., Zhang, J., Lin, F., et al., 1998. The Influence of the Expansion of the West Pacific Warm Pool on the Climate Change in the North China Plain. *Acta Geoscientia Sinica*, 19(4): 353–356 (in Chinese with English abstract).
- Lin, X., Zhu, L. P., Wang, Y., et al., 2008. Environmental Changes Reflected by *n*-Alkanes of Lake Core in Nam Co on the Tibetan Plateau since 8.4 ka B.P.. *Science Bulletin*, 53 (19): 3051–3057. <https://doi.org/10.1007/s11434-008-0313-6>
- Linsley, B.K., 1996. Oxygen-Isotope Record of Sea Level and Climate Variations in the Sulu Sea over the Past 150,000 Years. *Nature*, 380 (6571): 234–237. <https://doi.org/10.1038/380234a0>
- Meyers, P. A., Ishiwatari, R., 1993. Lacustrine Organic Geochemistry—An Overview of Indicators of Organic Matter Sources and Diagenesis in Lake Sediments. *Organic Geochemistry*, 20 (7): 867–900. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(93\)90100-p](https://doi.org/10.1016/0146-6380(93)90100-p)
- Ouyang, X.G., Guo, F., Bu, H.M., 2015. Lipid Biomarkers and Pertinent Indices from Aquatic Environment Record Paleoclimate and Paleoenvironment Changes. *Quaternary Science Reviews*, 123: 180–192. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.06.029>
- Pu, Y., Wang, C.F., Meyers, P.A., 2017. Origins of Biomarker Aliphatic Hydrocarbons in Sediments of Alpine Lake Ximencuo, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 475: 106–114.
- Sachse, D., Radke, J., Gleixner, G., 2004. Hydrogen Isotope Ratios of Recent Lacustrine Sedimentary *n*-Alkanes Record Modern Climate Variability. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(23): 4877–4889. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.06.004>
- Seki, O., Nakatsuka, T., Shibata, H., et al., 2010. A Compound-Specific *n*-Alkane $\delta^{13}C$ and δD Approach for Assessing Source and Delivery Processes of Terrestrial Organic Matter within a Forested Watershed in Northern Japan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74 (2): 599–613. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.10.025>
- Shen, J.H., Xiao, G.Q., Wang, Z.X., et al., 2017. Distribution of *n*-Alkanes in Miocene Loess in Qinan, Western Chinese Loess Plateau, and Its Palaeoenvironmental Implications. *Science China Earth Sciences*, 60(5): 921–928. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-9013-6>
- Wang C.M., Guo S.Q., 2005. Age Dating of Lacustrine Deposits in the Ningjinbo Area, Shijiazhuang, North China

- Plain. *Geological Bulletin of China*, 24(7): 655—659 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. L., Fang, X. M., Bai, Y., et al., 2007. Distribution of Lipids in Modern Soils from Various Regions with Continuous Climate (Moisture-Heat) Change in China and Their Climate Significance. *Science China: Earth Sciences*, 50(4): 600—612. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-2062-9>
- Wang, S. P., Jia, G. D., Zhao, Y., et al., 2010. Plant Wax *n*-Alkanes Record of the Holocene Paleoclimatic Changes from a Core Sediment of Hurleg Lake in the Qaidam Basin. *Quaternary Sciences*, 30(6): 1097—1104 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C., 1992. Evolution of Natural Environment in North China Plain since 40 000 Years. China Science and Technology Press, Beijing, 105—134 (in Chinese).
- Xie, S. C., Nott, C. J., Avsejs, L. A., et al., 2004. Molecular and Isotopic Stratigraphy in an Ombrotrophic Mire for Paleoclimate Reconstruction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(13): 2849—2862.
- Yamada, K., Ishiwatari, R., 1999. Carbon Isotopic Compositions of Long-Chain *n*-Alkanes in the Japan Sea Sediments: Implications for Paleoenvironmental Changes over the Past 85 kyr. *Organic Geochemistry*, 30(5): 367—377. [https://doi.org/10.1016/s0146-6380\(99\)00012-1](https://doi.org/10.1016/s0146-6380(99)00012-1)
- Yang, G. F., Wu, F. D., Chen, Z. H., et al., 2015. *n*-Alkane Distribution and Their Palaeoenvironmental Implications in Fluvial-Lacustrine Sediments in Dengkou, Inner Mongolia. *Earth Science*, 40(2): 327—333 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. J., Yang, G. F., Chen, Z. H., et al., 2018. Distribution of *n*-Alkanes Indicative of Paleoclimatic Change in Palaeolake of Yanqing, Beijing. *Earth Science*, 43(11): 4120—4127 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. J., Yang, G. F., Chen, Z. H., et al., 2017. Paleoclimatic Evolution Inferred from Organic Carbon Isotope of Lacustrine Sediments in the Yanqing Basin of Beijing since Late Pleistocene. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 31(12): 92—97 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. S., 1987. Palaeoclimate Variability of the North China Plain for the Last 120 000 Years. *Geographical Research*, 6(4): 54—61 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, W. J., Zheng, Y. H., Meyers, P. A., et al., 2010. Postglacial Climate-Change Record in Biomarker Lipid Compositions of the Hani Peat Sequence, Northeastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 294(1—2): 37—46. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.02.035>

附中文参考文献

- 郭盛乔, 王苏民, 杨丽娟, 等, 2005. 末次盛冰期华北平原古气候古环境演化. *地质论评*, 51(4): 423—427.
- 林景星, 张静, 林防, 等, 1998. 西太平洋暖池扩张对华北平原气候变化的影响——华北平原 4 万年以来升温事件的新证据. *地球学报*, 19(4): 353—356.
- 王成敏, 郭盛乔, 2005. 华北平原石家庄东南部宁晋泊地区湖相地层的年龄测定. *地质通报*, 24(7): 655—659.
- 王素萍, 贾国东, 赵艳, 等, 2010. 柴达木盆地克鲁克湖全新世气候变化的正构烷烃分子记录. *第四纪研究*, 30(6): 1097—1104.
- 吴忱, 1992. 华北平原四万年以来自然环境演变. 北京: 中国科学技术出版社, 105—134.
- 杨桂芳, 武法东, 陈正洪, 等, 2015. 内蒙古磴口河湖相沉积物正构烷烃分布特征及其环境意义. *地球科学*, 40(2): 327—333.
- 张慧娟, 杨桂芳, 陈正洪, 等, 2017. 北京延庆盆地晚更新世以来的古气候演化: 有机碳同位素记录. *干旱区资源与环境*, 31(12): 92—97.
- 张慧娟, 杨桂芳, 陈正洪, 等, 2018. 北京延庆古湖正构烷烃分布特征及古气候意义. *地球科学*, 43(11): 4120—4127.
- 赵英时, 1987. 华北平原十二万年以来的古气候变化. *地理研究*, 6(4): 54—61.