

doi:10.3799/dqkx.2016.049

# 腾格里沙漠东缘 26 ka 来环境演化的植硅体记录

顾延生<sup>1,2</sup>, 刘胡玫<sup>3</sup>, 曾佐勋<sup>4</sup>, 蔡雄飞<sup>4</sup>, 李志勇<sup>4</sup>

1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学湿地演化与生态恢复湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

4. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 贺兰山中段西侧沙漠戈壁沉积发育, 生态环境脆弱, 对探讨末次冰期以来气候变化与沉积响应具有重要意义. 选择了腾格里沙漠东缘晚更新世晚期以来的洪积物剖面进行了初步古环境研究. 在数字填图系统和野外路线调查基础上, 对贺兰山中段西侧、腾格里沙漠东缘地貌第四纪沉积物进行了较详细的调查研究. 在 AMS<sup>14</sup>C 测年基础上, 从内蒙古阿拉善高原腰坝地区 Qp<sub>3</sub>-Qh<sup>pl</sup> 洪积剖面沉积物中获得较丰富的植硅体化石, 主要类型有方型、长方型、扇型、哑铃型、齿型、帽型、尖型、平滑棒型、刺边棒型、突起棒型、三棱柱型等. 此外, 沉积物中赋存的大量炭屑和燃烧植硅体反映了古人类活动的历史. 运用植硅体组合和温暖指数分析重建了研究区 26 ka 来的古植被、古气候演化, 气候变化自早至晚经历了明显的干凉—暖干—暖湿—冷湿—干冷—暖干—暖湿 7 个阶段. 洪积扇缘沉积环境变化反映了气候的干湿变化, 且气候干湿变化与区域沙漠化和人类活动具有相关性.

**关键词:** 腾格里沙漠东缘; 洪积物; 植硅体; 环境变化; 古气候; 环境地质.

中图分类号: P66

文章编号: 1000-2383(2016)04-0605-07

收稿日期: 2015-07-12

## Environmental Change Documented by Pluvial Phytolith Records in the Past 26 ka on East Edge of Tengger Desert

Gu Yansheng<sup>1,2</sup>, Liu Humei<sup>3</sup>, Zeng Zuoxun<sup>4</sup>, Cai Xiongfei<sup>4</sup>, Li Zhiyong<sup>4</sup>

1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Hubei Key Laboratory of Wetland Evolution & Eco-Restoration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The desert and Gobi deposition are prevailing in the west edge of the middle Helan Mountain, which is subject to the fragility of eco-environment. It is important to explore the relationship between the climate change and deposition response of Gobi desert since the Last Glacial, a pluvial profile of late Late Pleistocene on the east edge of Tengger desert is employed to rebuild the palaeoenvironmental change based on the phytolith analysis. On the basis of regional geological survey, geomorphology pattern and Quaternary sediment distribution in the west of middle Helan Mountain and east edge of Tengger desert were investigated in detail. Based on the AMS<sup>14</sup>C dating and phytolith records, paleovegetation and paleoclimate changes are reconstructed in detail. Relatively abundant phytoliths are found in the pluvial sediments of Qp<sub>3</sub>-Qh profile at the Yaoba, including the following morphotypes: parallelepipedal bulliform cells (including square- and rectangle-shaped) and cuneiform bulliform cells (fan-shaped), bilobate, rondel, trapeziform sinuate, elongate and unciform hair cell (point-shaped), elongate smooth, elongate echinate, elongate protuberant, and prism, etc. In addition, there are abundant charcoals and burnt phytoliths in the sediments, indicating the history of ancient human activities. Phytolith assemblages with the warmth index analysis have rebuilt the history of paleovegetation and paleoclimate changes in the past 26 ka, showing 7 evident stages as follows: cool-dry, warm-

**基金项目:** 中国地质调查局项目(No.基(2010)01-04-02).

**作者简介:** 顾延生(1970—), 男, 教授, 主要从事第四纪生态地质与环境地质研究. E-mail: ysgu@cug.edu.cn

**引用格式:** 顾延生, 刘胡玫, 曾佐勋, 等, 2016. 腾格里沙漠东缘 26 ka 来环境演化的植硅体记录. 地球科学, 41(4): 605-611.

dry, warm-humid, cold-humid, cold-dry, warm-dry, and warm-humid. Our results demonstrate that the sedimentary environment of pluvial fan margin has a good response to the drought and wetness change of climate. The variation of the drought and wetness has a close relation with the regional desertification and ancient human activities.

**Key words:** east edge of Tengger desert; pluvial sediment; phytolith; environment change; paleoclimate; environmental geology.

## 0 引言

研究区位于贺兰山中段西侧的阿拉善高原,面积为 405.5 km<sup>2</sup>,属于内蒙古阿拉善左旗,地理坐标为 105°30′~105°45′E, 38°30′~38°40′N.研究区属大陆性干旱气候,区内没有常年性水系,但贺兰山东、西两麓季节性流水较发育,时有山洪发生.腾格里沙漠位于研究区西侧,沙漠内部,沙丘、湖盆、盐沼、草滩、山地及平原交错分布.腾格里沙漠沙丘属于固定、半固定沙丘,流动沙丘以链状沙丘和格状沙丘链为主,一般高为 10~20 m,也有复合型沙丘链高为 10~100 m,常向东南移动.贺兰山中段植被分布与地貌具有相关性,自山麓洪积台地至山顶植被的垂直带谱比较完整且分带明显,由高至低依次分布有高山草甸、寒性针叶林、温性针叶林、针阔叶混交林、山地疏林草原、旱生灌丛、荒漠草原、草原化荒漠和戈壁荒漠(徐万仁和张晋宁,1993).特殊的地理条件决定了研究区生态环境的脆弱性,其中新构造活化、土壤盐渍化、沙质荒漠化蔓延、湖泊和湿地萎缩、过度放牧和不合理农业灌溉活动等引起生态环境日益恶化,事实上,研究区植被生态系统的退化与该区水资源尤其是地下水资源的不合理开发密切相关(陈伟涛等,2014),这对该地区人类生存与社会可持续发展带来了巨大的挑战.

贺兰山不仅是我国季风与非季风区、干旱与半干旱区、外流区域和内流区的分界,而且起着扼制西北寒风侵袭银川平原、阻挡腾格里沙漠东移的天然屏障作用.贺兰山大规模隆升时间为始新世,上新世以来发生了快速隆升(赵红格等,2007).第四纪早期,我国西部受新构造运动增强的影响,大面积抬升,同时伴有地区性的差异性升降运动.区内贺兰山以上升为主,两侧的盆地相对沉降,内流水系形成.随着青藏高原环流系统形成,内陆气候加剧,山前易发泥石流、山洪,洪积扇地貌发育(张恭,1992;刘建辉等,2010).陇西盆地六盘山西侧山麓黄土—古土壤记录表明腾格里沙漠自 1.8 Ma 以来至少有两次大的扩张与全球性冰量增加、冬季风增强以及青藏高原隆升有成因上的联系(杨东等,2006).末次盛冰期以来,腾格里沙漠向东南方向大规模扩展,奠定了

东南缘现代沙漠环境的格局(强明瑞等,2000).腾格里沙漠南缘末次冰盛期以来主要经历了两次沙漠强烈扩张、两次退缩以及一次小幅度扩张的阶段(李琼等,2006).晚更新世晚期以来沉积环境演化与气候变化的关联性说明晚更新世晚期大气环流形式及水文循环过程曾发生过根本性的调整并与现代大不相同(张虎才等,2002).年代学与沉积学记录显示腾格里沙漠在晚更新世晚期(42~18<sup>14</sup>C ka BP)曾一度发育面积巨大古湖泊“腾格里大湖期”(张虎才,1997;马玉贞等,1998;彭金兰等,1998;张虎才等,2002),几乎同时期腾格里沙漠东北缘 50~60 ka 到全新世早期亦发育“吉兰泰—河套”古大湖(陈发虎等,2008).

迄今为止,尚未有贺兰山中段西侧(如腰坝地区)腾格里沙漠戈壁的第四纪沉积调查研究报道,本文利用 1:50 000 腰坝幅区域地质调查,详细调查了区域地貌与第四纪地层特征,对 Qp<sub>3</sub>-Qh 之交发育较好的洪积物剖面进行了较详细微体植物化石植硅体研究,结合年代学重建了研究区 26 ka 来古环境演化历史,相关研究对于了解晚更新世晚期以来沉积环境与气候变化、人类活动的关系具有重要的意义.

## 1 研究材料与方法

### 1.1 区域概况

根据野外调查的地貌形态和地层岩性的差异,将研究区地貌划分为 5 大类地貌单元:夷平面、洪积台地、洪积平原、风积物和湖积物(图 1).

**1.1.1 夷平面** 分布于研究区东侧海拔 1 600 m 以上,为晚新生代—第四纪初形成,大多由中生代—古近纪红层组成,由于构造抬升和气候条件的改造,使贺兰山中段地貌整体呈东仰西倾,夷平面上覆盖山地灰褐土和高山草甸土(图 1).

**1.1.2 洪积台地与平原** III 级洪积台地顶面高程为 1 600~1 700 m,地层为下更新统玉门组(Qp<sub>1y</sub>),为一套灰色、灰褐色厚层砾岩,含砾砂岩、砂岩与泥岩透镜体,半胶结,不整合超覆于古近纪—新近纪地层或更老地层之上,玉门组底部含砾砂岩经中国地

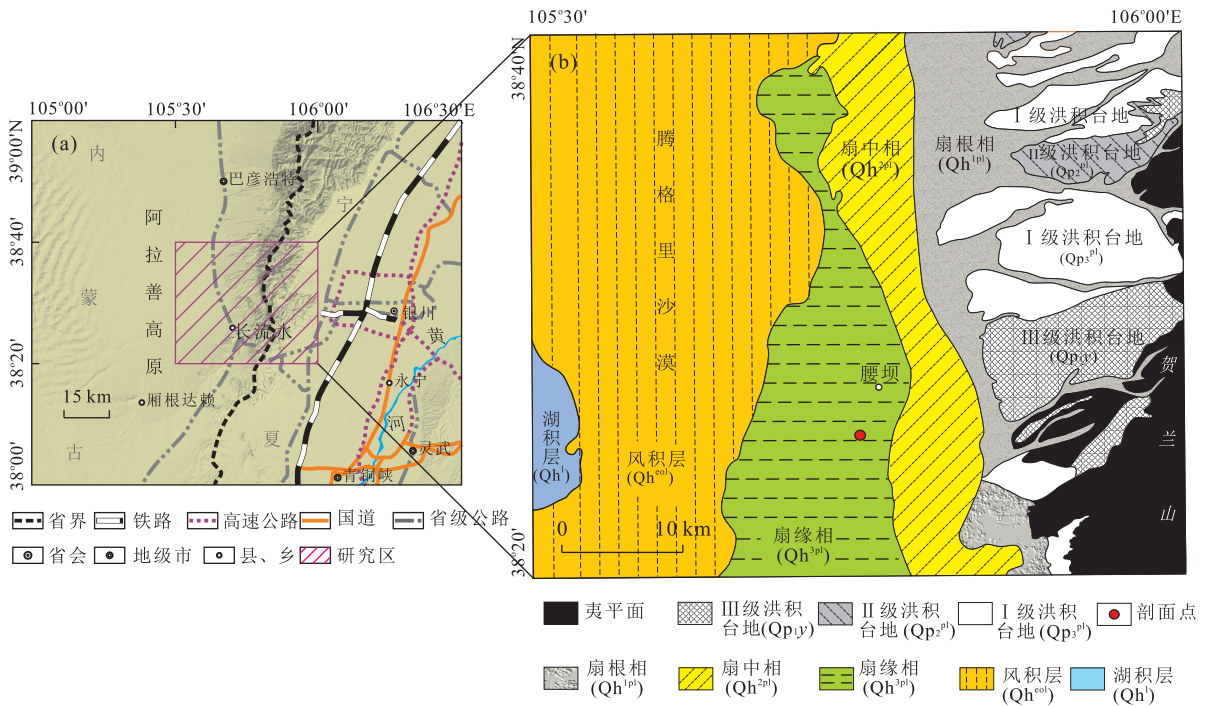


图 1 腾格里沙漠东缘研究区位置(a)及地貌第四系简图(b)

Fig.1 Sketch showing the study area and geomorphology (a) and Quaternary sediments (b) on the eastern edge of the Tengger desert

震局电子自旋共振测年年代为  $1\ 329 \pm 146$  ka BP. II级洪积台地面分布高程为  $1\ 500 \sim 1\ 600$  m, 主要地层中更新统洪积层 ( $Q_{p2}^{pl}$ ), 为灰色半胶结砂砾石层. I级洪积台地为大面积连续分布, 主要地层为上更新统洪积层 ( $Q_{p3}^{pl}$ ), 岩性为灰白色砂砾石层. 全新世洪积平原地貌由山前洪积扇组成, 沉积相带明显, 可划分为扇根相 ( $Q_{h1}^{pl}$ ), 扇中相 ( $Q_{h2}^{pl}$ ) 与扇缘相 ( $Q_{h3}^{pl}$ ). 扇缘相 ( $Q_{h3}^{pl}$ ) 广泛分布于研究区中部, 主要岩性为浅黄色含透镜体砾石砂土、砂层, 是研究古环境变化的较好载体(图 1).

**1.1.3 风积层与湖积层** 风积层 ( $Q_{h}^{col}$ ) 分布于研究区西部, 为浅黄、灰黄、黄色中—细砂以及粉砂层, 为现代活动沙丘, 在沙丘的顶风坡上常发育不对称波痕. 湖积层 ( $Q_{h}^l$ ), 零星分布于腾格里沙漠中, 岩性为黄褐、灰褐、灰绿色砂质粘土以及粘质砂土(图 1).

**1.2 研究剖面**

采样剖面为腰坝南侧黄土沟砖窑厂 PM111 剖面, 位于  $38^{\circ}28'29''N, 105^{\circ}38'95''E$ , 海拔为  $1\ 322$  m, 剖面出露厚度为  $3.5$  m. 自上而下岩性为:  $0 \sim 150$  cm 为灰黄色粘土质粉砂, 较疏松多孔;  $150 \sim 330$  cm 为灰红色粉砂质粘土, 夹透镜状砂砾石层, 透镜体长达  $4 \sim 5$  m, 宽度为  $40 \sim 100$  cm;  $330 \sim 350$  cm 为中、细砂层, 未见底(图 2). 笔者野外以  $10$  cm 间距连续采

样, 共采 34 块植硅体样品.  $120$  cm 处采集粘土质粉砂经中国科学院地球环境研究所加速器质谱 AMS<sup>14</sup>C 测年结果为  $7\ 802 \pm 37$  a BP, 树轮校正年龄为  $8\ 453 \sim 8\ 646$  cal a BP ( $2\sigma$ ),  $330$  cm 处采集粉砂质粘土经加速器质谱 AMS<sup>14</sup>C 测年结果为  $21\ 887 \pm 70$  a BP, 树轮校正年龄为  $25\ 949 \sim 26\ 732$  cal a BP ( $2\sigma$ ).

**1.3 分析方法**

植硅体样品于生物地质与环境地质国家重点实验室进行处理, 具体处理方法、镜下鉴定分类系统参



图 2 腰坝东南黄土沟  $Q_{p3}$ - $Q_h$  洪积层剖面

Fig.2 Pluvial sediments profile of  $Q_{p3}$ - $Q_h$  at Huangtugou on the southeast of Yaoba

照王永吉和吕厚远(1993),植硅体处理方法如下:(1)称取风干样品 5 g 置于 1 000 mL 大烧杯中,加入适量体积分数为 30% 的  $H_2O_2$  溶液,静置 24 h,以除去有机质;(2)加适量体积分数为 10% 的稀盐酸,静置 12 h,反应彻底为止,除去铁质、钙质;(3)加水至满,静置 2 h 以后倒掉上层清液,重复 5~6 次,稀释盐酸;(4)将样品移至离心管中,离心 10 min,除去水分,加入比重为 2.3 的重液,离心 10~20 min (2 000 r/min);(5)用吸管小心吸取大离心管中含植硅体的悬浮液,置于 250 mL 的小烧杯中,滴入几滴冰醋酸,加蒸馏水稀释,静置 12 h,倒掉上部液体,重复 3~4 次,除掉重液;(6)倾去小烧杯上部蒸馏水,将下部剩余液全部倒入小离心管中,离心 10 min (2 000 r/min),取出小离心管倒掉上部清液,烘干;(7)将烘干的小离心管中加入几滴无水酒精后,进行制片,供观察用;(8)于 Olympus BX51 光学显微镜 (500 $\times$ ) 下观察并统计 200 粒左右。

## 2 结果与讨论

利用植硅体分析可以提取陆相沉积物中赋存的古植被信息,由此进行古气候学研究是当前国际上生物地层和气候地层研究的一个新兴方向 (Lu *et al.*, 2006; Piperno, 2006; Gu *et al.*, 2008; Cordova *et al.*, 2011). 禾本科 6 大亚科特征植硅体组合带变化尤其具有气候变化的指示意义. 本次从内蒙古阿拉善高原剖面沉积物样品中观察到植硅体主要类型有方型、长方型、扇型、哑铃型、齿型、帽型、尖型、平滑棒型、刺边棒型、突起棒型、三棱柱型、多面体型等 (图 3). 此外,还有大量的炭屑和燃烧植硅体,反映了

人类活动的记录. 按照王永吉和吕厚远(1993)的分类系统,本文重点研究沉积物植硅体类型、组合特点及组合带在地层柱上的变化,利用王伟铭等(2003)植硅体气候指数方法重建温暖指数  $I_w$  (warmth index),  $I_w = (\text{示暖型植硅体}) / (\text{示暖型植硅体} + \text{示冷型植硅体总和})$ . 示暖型植硅体包括方型、长方型、扇型以及哑铃型,示冷型植硅体包括齿型、帽型、尖型、平滑棒型、刺边棒型以及突起棒型. 由于芦苇扇型在沉积物中出现不连续 (图 3), 且数量少, 本次研究把它统一归到扇型中进行温暖指数计算.

沉积物植硅体的组合特征记录着一个地方不同时期的植被面貌, 植被面貌的变化主要受控于气候和环境的变化, 根据植硅体组合特征、温暖指数和炭屑含量可以重建该区域气候环境变化和人类活动历史, 由早至晚环境演化经历了 3 个阶段 (图 4):

组合带 III (330~180 cm): 长方型—扇型—尖型—团粒型组合带, 对应样号 PM111-WG-16~34. 本带主要以示暖型植硅体为主, 温暖指数为 0.4~0.6, 海绵骨针含量较组合带 II 低. 团粒型植硅体较组合带 II 减少, 表明该组合带较组合带 II 气候更加温暖, 此阶段炭屑含量有波动, 整体较高, 反映区域温暖干旱化和较强人类活动, 依据古气候特征和沉积速率推算该带年龄为距今 26~20 ka, 为末次冰盛期前的相对温暖期, 该带底部 (315~330 cm) 出现的低温期 (III<sub>1</sub>) 可能与 H2 事件有关, 气候干凉 (Wang *et al.*, 2002).

组合带 II (180~85 cm): 长方型—尖型—棒型—团粒型组合带, 对应样号 PM111-WG-9~15. 本带主要以示冷型植硅体为主, 温暖指数波动于 0.35 附近, 整体小于 0.50, 气候寒冷, 海绵骨针和炭屑含

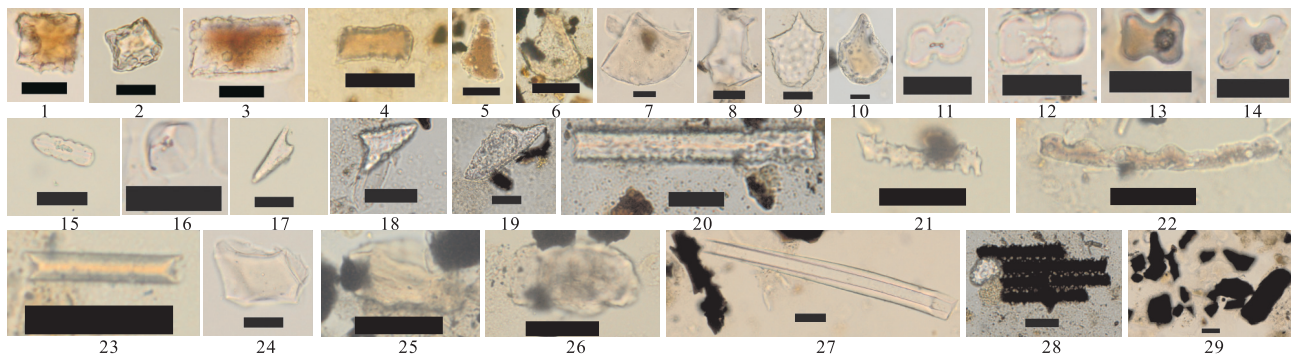


图 3 Qp<sub>3</sub>-Qh 洪积层主要植硅体及燃烧植硅体、炭屑形态

Fig. 3 Main phytolith types together with burnt phytoliths and charcoals in the pluvial sediments of Qp<sub>3</sub>-Qh

1~2. 方型; 3~4. 长方型; 5~10. 扇型 (其中 9~10 为芦苇扇型); 11~13. 哑铃型; 14. 十字型; 15. 齿型; 16. 帽型; 17~19. 尖型; 20. 平滑棒型; 21. 刺边棒型; 22. 突起棒型; 23. 三棱柱型; 24. 多面体型; 25~26. 团粒型; 27. 海绵骨针; 28. 燃烧棒型植硅体; 29. 炭屑; 比例尺为 20  $\mu\text{m}$

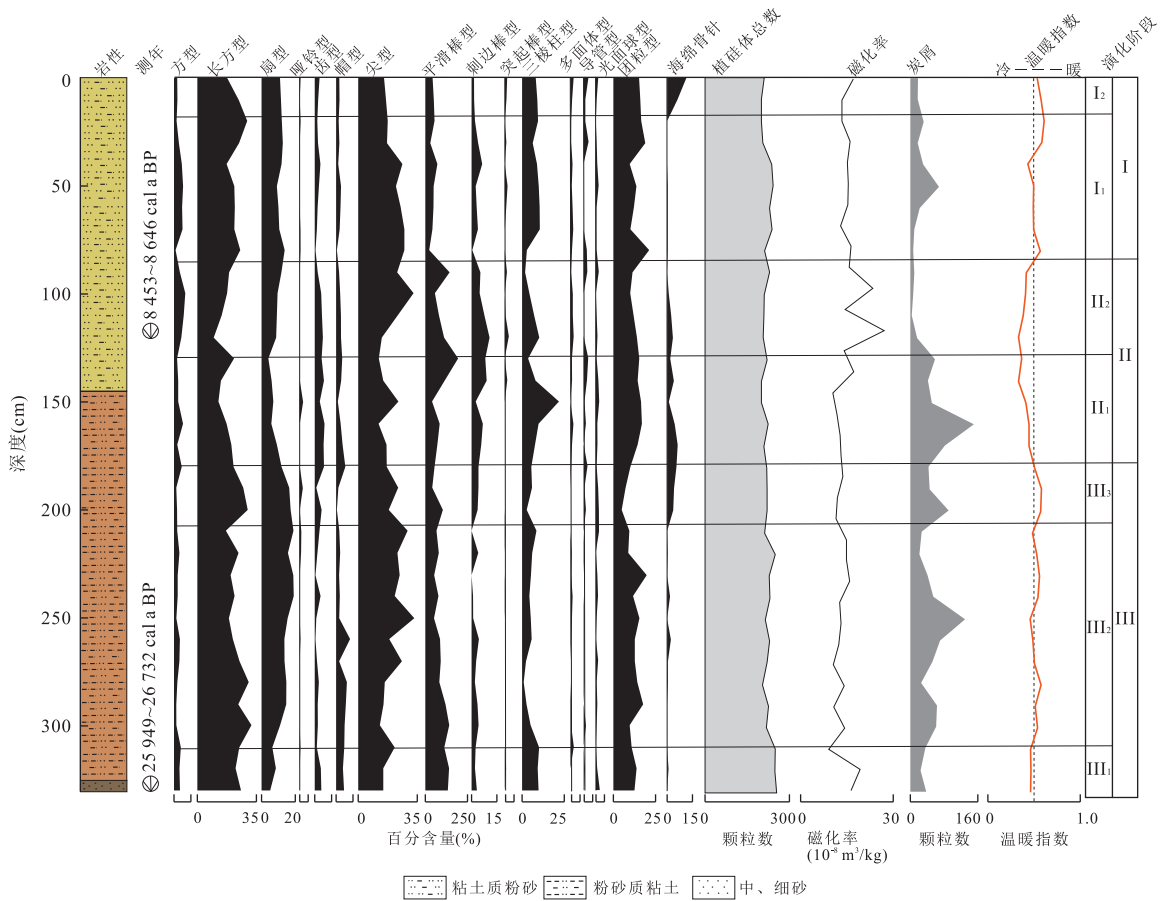


图 4 腾格里沙漠东缘 26 ka 来洪积层植硅体记录与环境演化

Fig.4 Phytolith records of environmental change in the past 26 ka on the eastern edge of Tengger desert

哑铃型、突起棒型、多面体型、管型、球型百分含量为 0~5%；方型、齿型百分含量为 0~10%

量表现为先增后减,海绵骨针的存在表明沉积环境有潮湿水体(如湖泊等)存在.该带早期(II<sub>1</sub>)气候冷湿,对应末次冰盛期,沉积物岩性由粉砂质粘土变为粘土质粉砂,炭屑含量高,说明人类活动强.晚期(II<sub>2</sub>)气候干冷,沉积物磁化率的突然加大可能与沙漠化加剧、表土侵蚀加强、沙丘堆积有关,低含量炭屑说明该时期人类活动弱. II<sub>1</sub> 与 II<sub>2</sub> 之交降温事件可能与新仙女木事件(YD)有关(Zhou *et al.*, 2004).

组合带 I (85~0 cm):长方型—扇型—尖型—团粒型组合带,对应样号 PM111-WG-1~9.主要以示暖型植硅体为主,温暖指数为 0.45~0.60,海绵骨针于后期升高,炭屑含量较高,与中全新世以来区域人类活动增强有关,同时期贺兰山东侧银川平原古人类活动强(权东计和李海燕, 2006),留下大量闻名中外的远古时期岩画(许成和卫忠, 1993; 乌恩, 1994).植硅体组合反映早期(I<sub>1</sub>)气候温暖偏干,对应全新世大暖期,与前人报道的中全新世干旱事件一致(陈发虎等, 2004; 隆浩等, 2007; 谢树成等,

2015),后期(I<sub>2</sub>)转湿润.

### 3 结论

在数字填图系统和野外路线调查基础上,本文查明了贺兰山中段西侧、腾格里沙漠东缘层状地貌、第四纪沉积物类型及其分布,建立了区域可对比第四纪地层序列.在此基础上,通过测年和微体古生物分析,详细研究了内蒙古阿拉善高原晚更新世—全新世以来洪积物剖面中的植硅体的类型、组合及其气候环境指示意义.沉积记录表明内蒙古阿拉善高原腰坝地区 26 ka 来气候变化经历了干凉—暖干—暖湿—冷湿—干冷—暖干—暖湿 7 个阶段.洪积扇缘沉积环境的变化响应了气候的干湿变化,且气候的干湿变化与区域人类活动强弱具有相关性,往往湿润时期炭屑含量相对丰富,人类活动较强,而干旱期风成沙丘发育,人类活动弱,炭屑含量较低.

致谢:野外地质调查工作得到了宁夏回族自治区

区地质环境监测总站的支持,宁夏环境监测总站李天斌、陆彦俊、杨国安、金学强高工和中国地质大学(武汉)樊光明教授、杨宝忠副教授、余淳梅副教授、余英讲师和王杰博士、硕士研究生靳海涛、梁泉、罗涛、王翰林、杨海乐、杨捷、金巍参加了野外调查工作,在此一并致谢。

## References

- Chen, F. H., Fan, Y. X., Chun, X., et al., 2008. Preliminary Study on the "Jilantai-Hetao" Mega-Lake in the Late Quaternary. *Chinese Science Bulletin*, 53(10): 1207—1219 (in Chinese).
- Chen, F. H., Wu, W., Zhu, Y., et al., 2004. A Mid-Holocene Drought Event Documented by Lake Sediments in the Alashan Plateau, Inner Mongolia, China. *Chinese Science Bulletin*, 49(1): 1—9 (in Chinese).
- Chen, W. T., Sun, Z. Y., Wang, Y. X., et al., 2014. Major Scientific Issues on Water Demand Studying for Groundwater-Development Vegetation Ecosystems in Inland Arid Regions. *Earth Science*, 39(9): 1340—1348 (in Chinese with English abstract).
- Cordova, C. E., Johnson, W. C., Mandel, R. D., et al., 2011. Late Quaternary Environmental Change Inferred from Phytoliths and Other Soil-Related Proxies: Case Studies from the Central and Southern Great Plains, USA. *Catena*, 85(2): 87—108. doi:10.1016/j.catena.2010.08.015
- Gu, Y. S., Pearsall, D. M., Xie, S. C., et al., 2008. Vegetation and Fire History of a Chinese Site in Southern Tropical Xishuangbanna Derived from Phytolith and Charcoal Records from Holocene Sediments. *Journal of Biogeography*, 35: 325—341. doi: 10.1111/j.1365—2699.2007.01763.x
- Li, Q., Pan, B. T., Gao, H. S., et al., 2006. Desert Evolution and Climate Change of Southern Margin of Tengger Desert since Last Glacial Maximum. *Journal of Desert Research*, 26(6): 875—879 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. H., Zhang, P. Z., Zheng, D. W., et al., 2010. Characteristics of Exhumation and Uplift Pattern of Helan Mountain in the Late Cenozoic. *Science in China (Series D)*, 40(1): 50—60 (in Chinese).
- Long, H., Ma, H. Z., Wang, N. A., et al., 2007. Mid-Holocene Climate Variations from Lake Records of NW Tengger Desert. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(3): 105—111 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. Y., Wu, N. Q., Yang, X. D., et al., 2006. Phytoliths as Quantitative Indicators for the Reconstruction of Past Environmental Conditions in China I: Phytolith-Based Transfer Functions. *Quaternary Science Reviews*, 26(5): 759—772. doi:10.1016/j.quascirev.2005.07.014
- Ma, Y. Z., Zhang, H. C., Li, J. J., 1998. On the Evolution of the Palynoflora and Climatic Environment during Late Pleistocene in Tengger Desert, China. *Acta Botanica Sinica*, 40(9): 871—879 (in Chinese with English abstract).
- Peng, J. L., Zhang, H. C., Ma, Y. Z., 1998. Late Pleistocene Limnic Ostracods and Their Environmental Significance in the Tengger Desert, Northwest China. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 15(1): 22—30 (in Chinese with English abstract).
- Piperno, D. R., 2006. Phytoliths: A Comprehensive Guide to Archaeologists and Palaeoecologists. Altamira Press, Lanham.
- Qiang, M. R., Li, S., Jin, M., et al., 2000. Aeolian Deposits on the Southeastern Margin of Tengger Desert and Desert Evolution during the Last 60 000 Years. *Journal of Desert Research*, 30(3): 256—259 (in Chinese with English abstract).
- Quan, D. J., Li, H. Y., 2006. Study on the Spatial Distribution and Historical Environment of Cliff Painting at Helankou. *Archaeology and Cultural Relics*, (3): 46—48 (in Chinese).
- Wang, W. M., Liu, J. L., Zhou, X. D., 2003. Climate Indexes of Phytoliths from Homo Erectus' Cave Deposits in Nanjing. *Chinese Science Bulletin*, 48(18): 1205—1208 (in Chinese).
- Wang, Y. J., Cheng, H., Edwards, R. L., et al., 2002. A High-Resolution Absolute-Dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China. *Science*, 294(5550): 2345—2348. doi:10.1126/science.1064618
- Wang, Y. J., Lü, H. Y., 1993. Phytolith Study and Its Application. China Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Wu, E., 1994. On the Age of Cliff Paintings in the Helan Mountain. *Cultural Relics*, (7): 70—75 (in Chinese).
- Xie, S. C., Hu, C. Y., Gu, Y. S., et al., 2015. Paleohydrological Variation since 13 ka BP in Middle Yangtze Region. *Earth Science*, 40(2): 198—205 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C., Wei, Z., 1993. Dating of Cliff Paintings in the Helan Mountain. *Cultural Relics*, (9): 51—54 (in Chinese).
- Xu, W. R., Zhang, J. N., 1993. Study on Woody Flora in the Natural Protective Area of Helan Mountain. *Journal of Ningxia Agricultural College*, 14(4): 23—27 (in Chinese with English abstract).
- Yang, D., Fang, X. M., Dong, G. R., et al., 2006. Loess Deposit

- Characteristic in Duanxian Section of Longxi Basin and Its Reflected Evolution of Tengger Desert at North of China since Last 1.8 Ma. *Journal of Desert Research*, 26 (1): 6-13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G., 1992. Quaternary Deposit and Environment Evolution on the Western Part of the Helan Mountain. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 4(2): 88-95 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. C., 1997. Preliminary Study on the Chronology of Lacustrine Deposits and Determination of High Palaeo-Lake Level in Tengger Desert since Late Pleistocene. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 33 (2): 87-91 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. C., Ma, Y. Z., Peng, J. L., et al., 2002. The Paleolakes and Paleo-Environment in the Tengger Desert during 42-18 ka BP. *Chinese Science Bulletin*, 47(24): 1847-1857 (in Chinese).
- Zhao, H. G., Liu, C. Y., Wang, F., et al., 2007. The Time Limit of Uplift and Its Evolution of the Helan Mountain. *Science in China (Series D)*, 37(Suppl. 1): 185-192 (in Chinese).
- Zhou, W. J., Yu, X. F., Jull, A. J. T., et al., 2004. High-Resolution Evidence from Southern China of an Early Holocene Optimum and a Mid-Holocene Dry Event during the Past 18 000 Years. *Quaternary Research*, 62 (1): 39-48. doi:10.1016/j.yqres.2004.05.004
- 刘建辉, 张培震, 郑德文, 等, 2010. 贺兰山晚新生代隆升的剥露特征及其隆升模式. *中国科学(D辑)*, 40(1): 50-60.
- 隆浩, 马海州, 王乃昂, 等, 2007. 腾格里沙漠西北缘湖泊沉积记录的全新世中期气候环境. *海洋地质与第四纪地质*, 27(3): 105-111.
- 马玉贞, 张虎才, 李吉均, 1998. 腾格里沙漠晚更新世孢粉植物群与气候环境演变. *植物学报*, 40(9): 871-879.
- 彭金兰, 张虎才, 马玉贞, 1998. 腾格里沙漠晚更新世湖相沉积介形类及其环境意义. *微体古生物学报*, 15(1): 22-30.
- 强明瑞, 李森, 金明, 等, 2000. 60 ka 来腾格里沙漠东南缘风成沉积与沙漠演化. *中国沙漠*, 30(3): 256-259.
- 权东计, 李海燕, 2006. 贺兰口岩画空间分布与历史环境风貌研究. *考古与文物*, (3): 46-48.
- 王伟铭, 刘金陵, 周晓丹, 2003. 南京直立人洞穴堆积的植硅体气候指数研究. *科学通报*, 48(11): 1205-1208.
- 王永吉, 吕厚远, 1993. 植物桂酸体研究及应用. 北京: 海洋出版社.
- 乌恩, 1994. 试论贺兰山岩画的年代. *文物*, (7): 70-75.
- 谢树成, 胡超涌, 顾延生, 等, 2015. 最近 13 ka 以来长江中游古水文变化. *地球科学*, 40(2): 198-205.
- 许成, 卫忠, 1993. 贺兰山岩画断代研究. *文物*, (9): 51-54.
- 徐万仁, 张晋宁, 1993. 贺兰山自然保护区木本植物区系研究. *宁夏农学院学报*, 14(4): 23-27.
- 杨东, 方小敏, 董光荣, 等, 2006. 1.8 Ma BP 以来陇西断岷黄土剖面沉积特征及其反映的腾格里沙漠演化. *中国沙漠*, 26(1): 6-13.
- 张恭, 1992. 贺兰山西麓第四纪沉积与环境演变. *干旱区资源与环境*, 4(2): 88-95.
- 张虎才, 1997. 腾格里沙漠晚更新世以来湖泊沉积年代学及高湖面期的初步确定. *兰州大学学报(自然科学版)*, 33 (2): 87-91.
- 张虎才, 马玉贞, 彭金兰, 等, 2002. 距今 42~18 ka 腾格里沙漠古湖泊及古环境. *科学通报*, 47(24): 1847-1857.
- 赵红格, 刘池阳, 王锋, 等, 2007. 贺兰山隆升时限及其演化. *中国科学(D辑)*, 37(增刊 1): 185-192.

#### 附中文参考文献

- 陈发虎, 范育新, 春喜, 等, 2008. 晚第四纪“吉兰泰—河套”古大湖的初步研究. *科学通报*, 53(10): 1207-1219.
- 陈发虎, 吴薇, 朱艳, 等, 2004. 阿拉善高原中全新世干旱事件的湖泊记录研究. *科学通报*, 49(1): 1-9.
- 陈伟涛, 孙自永, 王焰新, 等, 2014. 论内陆干旱区依赖地下水的植被生态需水量研究关键科学问题. *地球科学*, 39 (9): 1340-1348.
- 李琼, 潘保田, 高红山, 等, 2006. 腾格里沙漠南缘末次冰盛期以来沙漠演化与气候变化. *中国沙漠*, 26(6): 875-879.