



科学钻探揭示塔克拉玛干沙漠腹地现代沙漠景观形成于距今30万年前

余子莹¹, 王鑫^{1*}, 陈发虎²

1. 兰州大学资源环境学院, 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;

2. 中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原地球系统与资源环境重点实验室, 古生态与人类适应团队, 北京 100101

* 联系人, E-mail: xinw@lzu.edu.cn

Scientific drilling reveals the modern desert landscape in the hinterland of the Taklimakan Desert formed 300000 years ago

Ziying Yu¹, Xin Wang^{1*} & Fahu Chen²

¹ Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

² Group of Alpine Paleoecology and Human Adaptation (ALPHA), State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System, Resources and Environment (TPESRE), Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

* Corresponding author, E-mail: xinw@lzu.edu.cn

doi: [10.1360/TB-2024-1169](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1169)

塔克拉玛干沙漠是中国最大的沙漠, 是世界第二大流动沙漠, 了解其地质演化历史对理解亚洲中纬度沙漠景观的形成至关重要。沙漠的形成演化历史复杂, 可大体划分为两个演化阶段: (1) 沙漠的初始形成, 以沙漠腹地最老风成砂的出现和下风向地区风成沉积的大规模堆积为标志; (2) 现代沙漠景观的形成, 以沙漠腹地连续的风成砂发育为标志。前期研究主要围绕塔克拉玛干沙漠边缘的风成沉积序列和沙漠中西部地区的玛扎塔格剖面开展, 由于缺少来自于沙漠腹地的直接证据, 加之用于约束沙漠形成时代的古地磁定年手段在天然剖面的应用中普遍存在多解性, 致使在沙漠的初始形成时代上先后提出了530万年^[1]、700万年^[2]、340万年^[3]、490万年^[4]、2200~2600万年^[5]、360万年^[6]等不同认识; 由于沙漠腹地缺少天然剖面, 在现代沙漠景观的形成时代上仅有来自于罗布泊地区的研究, 揭示了沙漠东部的现代沙漠景观可能形成于50~70万年之间^[7], 但沙漠中心位置现代沙漠景观的形成时代尚不清楚。

为解决沙漠形成演化难题, 兰州大学西部环境教育部重点实验室自2008年起启动了“西部环境钻探”科学研究计划(WEDP), 至今已在塔克拉玛干沙漠、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、古尔班通古特沙漠等主要沙漠的腹地开展了科学钻探(图1)。其中, 在塔克拉玛干沙漠腹地钻取了钻探深度达1340 m、取心率高达95%的透底岩心(钻孔编号: WEDP14; 钻孔坐标: 38°58'1"N, 83°41'22"E), 获得了我国最大沙漠形

成演化研究的一手资料。基于WEDP14钻孔岩心上部200 m地层的沉积相分析和年代学研究结果, 重建了塔克拉玛干沙漠腹地180万年以来的环境变化历史, 厘定了该沙漠中心位置的现代沙漠景观形成于距今30万年前。相关研究结果发表在*Science Bulletin*^[8], 本文结合初步的古地磁定年结果对该文进行简要报道。

WEDP14钻孔位于塔中地区, 岩心0~47 m以中细砂为主, 而47~200 m则以分选较好的中细砂层、分选较差的中粗砂层和细粉砂-黏土层交互沉积为特征。基于岩性、沉积构造、颜色、地层接触关系等沉积学证据, 并结合粒度组成和石英颗粒微型态特征, 辨识出风成砂和河湖相沉积两种沉积相。其中, 风成砂沉积常见高角度交错层理或近水平层理、分选较好、磨圆度高、质地疏松, 其粒度和石英颗粒微型态特征均与现代沙丘砂的类似; 河湖相沉积物常见水平层理、分选较差、磨圆度低、胶结好, 其粒度和石英颗粒微型态特征均与现代河湖相沉积物特征类似(图2)。基于粒度端元分析方法建立的风成砂含量变化序列, 自钻孔底部到顶部阶段性增加、在47 m处急剧增加(图2)。通过与其他钻孔资料的对比, 发现沙漠腹地顶部连续的风成砂层的厚度多为50 m左右, 因而WEDP14钻孔岩心连续风成砂的发育时代可指示沙漠腹地现代沙漠景观的形成时代。

准确的定年是重建沙漠形成演化历史的关键。该文利用钾长石红外释光测年和²⁶Al/¹⁰Be宇宙核素埋藏测年方法对钻

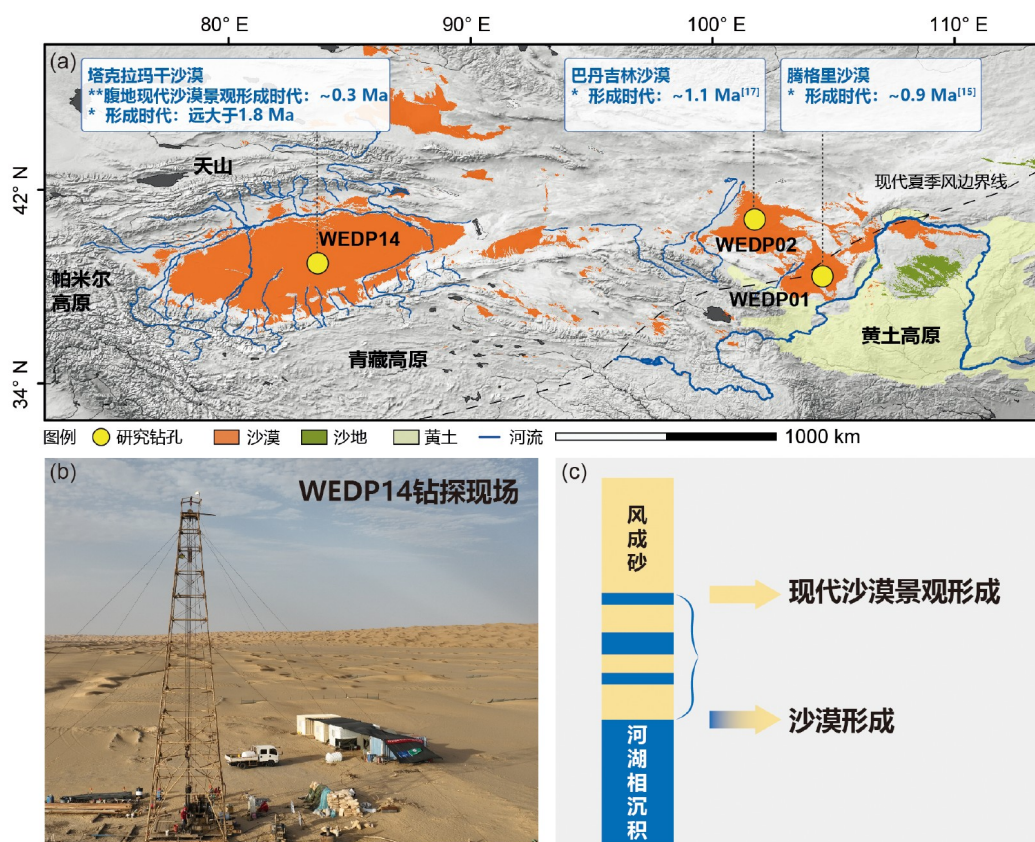


图1 (网络版彩色)沙漠与黄土分布图及主要沙漠的形成时代(a)、WEDP14钻孔钻探现场(b)和沙漠形成演化阶段(c)。沙漠与黄土分布范围修改自文献[9,10]

Figure 1 (Color online) Desert-loess distribution map and formation age of major deserts (a), WEDP14 drilling site photos (b), and stages of desert formation and evolution (c). The distribution of desert and loess is redrawn from Refs. [9,10]

孔岩心进行了绝对定年研究,并参考初步的古地磁测年结果建立了年代标尺(图2)。其中,岩心上部50 m的释光测年结果具有随地层深度增加逐渐变老的趋势,且与古地磁定年结果一致,通过两种测年结果的交叉检验,可以确定连续风成砂沉积的底界年代为~30万年。在岩心116和188 m处的河流沉积物采集了宇宙核素测年样品,并在美国普渡大学完成测量分析,获得的地质年代分别为131万年(1.31 ± 0.18 Ma)和218万年(2.18 ± 0.23 Ma)。由于河流沉积物在埋藏之前可能经历多次再循环过程,加之河流沉积物的核素比值多低于标准值,这两个宇宙成因核素埋藏年代指示了沉积物的最大沉积年代^[11],可为古地磁定年提供重要的参考依据。目前,WEDP14钻孔1340 m岩心的古地磁定年研究还在进行中,从初步结果来看,顶部200 m岩心记录了3个正极性段和5个正极性事件(图2),以顶部年龄(0 Ma)作为古地磁对比的“铁帽子”,以上部岩心高分辨率的释光测年结果和下部岩心宇宙核素埋藏测年结果(最大沉积年龄)作为独立的对比依据,可以很好解决古地磁定年中的多解性难题。综合三种测年方法,建立了可靠的年代标尺,确定岩心200 m处的堆积时代为180万年

(图2),由于钻孔下部上千米的岩心中还有相当规模的埋藏古风成砂发育,推测研究区沙漠环境的初始形成时代远早于180万年(具体时代还在进一步研究中)。

WEDP14钻孔位于塔克拉玛干沙漠腹地,受河流影响小,该地区的沉积记录能很好指示沙漠景观的形成过程。该文发现,塔克拉玛干沙漠腹地30万年以来发育了连续的风成砂沉积,证实了即便在相对温暖的间冰期,河流也未曾到达该地区,意味着沙漠腹地现代沙漠景观形成于距今30万年前,与沙漠边缘昆仑山黄土粉尘沉积通量显著增加的时代一致^[6]。塔克拉玛干沙漠位于西风环流影响区,在极端情况下也受亚洲季风降水影响,河流水量变化主要受青藏高原东北缘的山地降水和冰川融水补给。对比位于西风区塔吉克斯坦黄土的红色指标变化^[12]、季风区黄土高原黄土的红色指标变化^[13]和青藏高原北缘冰川活动历史^[14],可以发现塔克拉玛干沙漠腹地现代沙漠景观的形成与西风水汽的减少、亚洲季风的衰退以及青藏高原北缘山地冰川的发育密切相关,勾勒了全球气候和区域构造影响下西风-季风协同作用对沙漠景观演化的重要驱动作用。

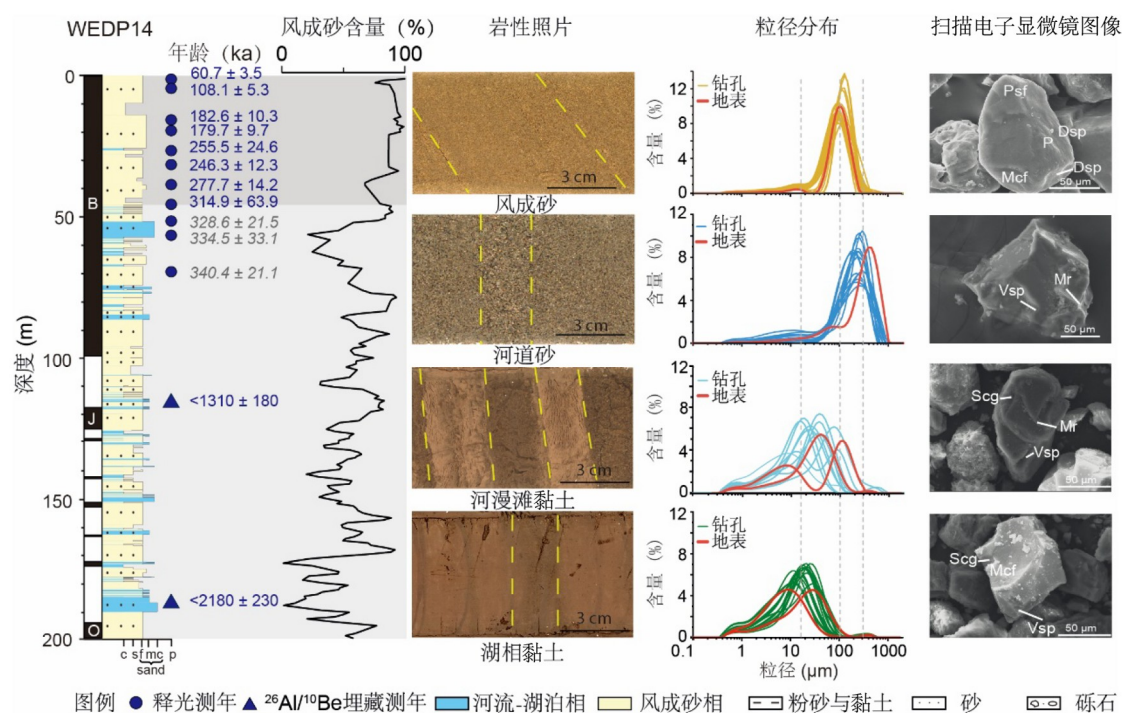


图 2 (网络版彩色)WEDP14 钻孔年代学与沉积学结果

Figure 2 (Color online) WEDP14 drill core chronology and sedimentology results

研究团队之前完成了腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠腹地的科学钻探研究,通过腾格里沙漠腹地两个钻孔(WEDP01, WEDP06)的研究,揭示了腾格里沙漠腹地360~90万年之间以河湖相沉积为主,自约90万年风成砂开始大规模堆积,其后具有间冰期河湖地层发育、冰期风砂地层发育的演替特征,且不同位置的记录在空间上具有一定对比性^[15,16];通过巴丹吉林沙漠腹地钻孔岩心(WEDP02)的研究,发现在白垩系基岩上发育了厚达270 m的风成砂,厘清了该沙漠的初始形成时代为约1100万年,其后在相对温暖的间冰期(13~15阶段、5阶段、全新世)发育了三套湖相地层^[17]。

综合研究团队在巴丹吉林和腾格里沙漠腹地的科学钻探研究成果,可以揭示中国主要沙漠形成演化的时空差异。(1) 30万年来塔克拉玛干沙漠腹地现代沙漠景观业已形成,而位于季风边缘区的巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠在此期间还有河湖繁盛的时期,表明西风影响区沙漠景观的演化历史与季风边缘区的不尽相同,需要进一步深入研究西风演化、季风演化以及西风-季风协同作用对不同区域沙漠环境变迁的影响机理。(2) WEDP14钻孔下部深达1000多米的地层中还有大规模的古沙丘砂沉积,表明其形成时代远早于180万年,而巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠分别形成于距今110万年^[17]和90万年^[15](图1),揭示了大型沙漠的形成演化具有显著的空间差异,除干旱气候背景外,区域构造和地貌条件所引起的物质供应能力差异可能起着重要影响,需进一步深入研究。(3)

尽管在形成时代上存在较大差异,3个沙漠的形成演化也具有共同的特征,例如,中更新世转型期(125~70万年)是所有沙漠形成演化的关键时期,在塔克拉玛干沙漠体现在风成砂含量的急剧增加(图1(b)),在腾格里和巴丹吉林沙漠体现在沙漠的初始形成^[15,17]。(4) 这3个大型沙漠腹地中晚第四系地层均具有风成砂沉积和河湖相地层交互沉积的特征,初步的定年结果显示,河湖相沉积主体发生于相对暖湿的间冰期时段,近年来在全球变暖影响下沙漠腹地洪水事件屡见不鲜,特别是2024年8月塔克拉玛干沙漠的洪水事件备受关注,对比地质历史时期沙漠环境变化规律和近现代观测资料可以发现,全球变暖对中纬度地区西风-亚洲季风系统的影响及其链式响应,可对沙漠地区的环境变迁产生深远影响,如何融合古今,明确全球变暖到什么程度可导致沙漠腹地形成稳定的河湖环境,将为极端干旱区应对气候变化和解决荒漠化问题提供科学依据。

总之,科学钻探研究结果表明,塔克拉玛干沙漠腹地现代沙漠景观形成于30万年前,沙漠的初始形成时代远早于180万年,具体时代还有待进一步研究。目前证据表明,塔克拉玛干沙漠与巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠的形成演化存在显著的空间差异,且多数沙漠的形成时代远晚于黄土高原黄土的堆积时代(22~25 Ma)^[18,19],意味着沙漠可能并非中国黄土的唯一源区,干旱区面积广布的荒漠(包括戈壁沙漠、冲洪积扇、干涸湖盆等)在黄土高原的形成和北半球粉尘的传输

中起着与沙漠同等重要的作用。进一步的沙漠钻探研究极为重要,一方面通过不同位置钻孔记录的对比,可以极大地增强我们对这些广阔沙漠景观的时空演变历史和驱动机制的

认识;另一方面可通过沙漠记录、黄土记录、远洋粉尘记录的对比研究,极大推动我们对亚洲粉尘迁移循环规律及其对全球气候变化影响的理解。

致谢 感谢第三次新疆综合科学考察研究(2021xjkk0302)和国家自然科学基金(42072211)资助。

推荐阅读文献

- 1 Sun J, Liu T. The age of the Taklimakan Desert. *Science*, 2006, 312: 1621
- 2 Sun J, Zhang Z, Zhang L. New evidence on the age of the Taklimakan Desert. *Geology*, 2009, 37: 159–162
- 3 Sun D, Bloemendal J, Yi Z, et al. Palaeomagnetic and palaeoenvironmental study of two parallel sections of late Cenozoic strata in the central Taklimakan Desert: Implications for the desertification of the Tarim Basin. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2011, 300: 1–10
- 4 Liu W, Liu Z, An Z, et al. Late Miocene episodic lakes in the arid Tarim Basin, western China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111: 16292–16296
- 5 Zheng H, Wei X, Tada R, et al. Late Oligocene–early Miocene birth of the Taklimakan Desert. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 7662–7667
- 6 Fang X, An Z, Clemens S C, et al. The 3.6-Ma aridity and westerlies history over midlatitude Asia linked with global climatic cooling. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2020, 117: 24729–24734
- 7 Liu W, Liu Z, Sun J, et al. Onset of permanent Taklimakan Desert linked to the mid-Pleistocene transition. *Geology*, 2020, 48: 782–786
- 8 Wang X, Yu Z, Luo C, et al. Spatial heterogeneity in the formation of large deserts in midlatitude Asia revealed by drill core evidence. *Sci Bull*, 2024, 69: 1
- 9 Liu T. *Loess and the Environment* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1985 [刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985]
- 10 Yang X, Liang P, Fang Y, et al. *Chinese deserts and environmental changes* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2024 [杨小平, 梁鹏, 方依曼, 等. 中国沙漠与环境演变. 北京: 科学出版社, 2024]
- 11 Granger D E. A review of burial dating methods using ^{26}Al and ^{10}Be . *Geol Soc Am Spec Pap*, 2006, 415: 1–16
- 12 Ding Z L, Ranov V, Yang S L, et al. The loess record in southern Tajikistan and correlation with Chinese loess. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 200: 387–400
- 13 Wang F, Sun D H, Guo F, et al. Quantitative reconstruction of paleo-temperature and paleo-precipitation of Lingtai profile in Loess Plateau during the past 7 Ma (in Chinese). *J Earth Environ*, 2012, 3: 781–791 [王飞, 孙东怀, 郭峰, 等. 黄土高原灵台剖面过去7 Ma古温度、古降水的半定量重建. 地球环境学报, 2012, 3: 781–791]
- 14 Heyman J. Paleoglaciation of the Tibetan Plateau and surrounding mountains based on exposure ages and ELA depression estimates. *Quat Sci Rev*, 2014, 91: 30–41
- 15 Li Z, Sun D, Chen F, et al. Chronology and paleoenvironmental records of a drill core in the central Tengger Desert of China. *Quat Sci Rev*, 2014, 85: 85–98
- 16 Li Z, Wang F, Luo C, et al. Enhanced drying of the Tengger desert, northwest margin of East Asian summer monsoon during warming interglacials after 500 ka. *Quat Sci Rev*, 2022, 293: 107735
- 17 Wang F, Sun D, Chen F, et al. Formation and evolution of the Badain Jaran Desert, North China, as revealed by a drill core from the desert centre and by geological survey. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2015, 426: 139–158
- 18 Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 2002, 416: 159–163
- 19 Qiang X, An Z, Song Y, et al. New eolian red clay sequence on the western Chinese Loess Plateau linked to onset of Asian desertification about 25 Ma ago. *Sci China Earth Sci*, 2011, 54: 136–144