

舒培仙,李保生,牛东风,等.毛乌素沙漠东南缘滴哨沟湾剖面DGS1层段粒度特征及其指示的全新世气候变化[J].地理科学,2016,36(3):448-457.[Shu Peixian, Li Baosheng, Niu Dongfeng et al. Climate Variations Recorded by the Grain-size from the DGS1 Segment in the Southeast of China's Mu Us Desert During the Holocene. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(3): 448-457.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.03.017

毛乌素沙漠东南缘滴哨沟湾剖面DGS1层段 粒度特征及其指示的全新世气候变化

舒培仙^{1,2}, 李保生^{1,2}, 牛东风¹, 王丰年³, 温小浩¹, 司月君⁴, 陈琼¹

(1. 华南师范大学地理科学学院, 广东 广州 510631; 2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710061; 3. 惠州学院旅游系, 广东 惠州 516007; 4. 广西师范学院规划与地理科学学院, 广西 南宁 530001)

摘要:分析滴哨沟湾剖面全新统DGS1段的粒度数据,认为流动沙丘砂、泥炭、砂质古土壤、古固定-半固定沙丘砂到湖沼相和次生黄土的颗粒总体上变细,分选变差。结合腹足类动物化石和湖沼相地层中石英砂粒表面电镜扫描,认为DGS1粒度结果实际上是全新世以来多次冬夏季风的交互演替过程的气候-地质记录。据此,将DGS1粒度信号记录的全新世气候分为4个阶段——全新世早期好转期、全新世鼎盛期、大暖期向寒冷期转变波动期和降温不稳定的沙漠化频繁变化时期。

关键词:滴哨沟湾剖面;粒度;气候变化;全新世;毛乌素沙漠

中图分类号:P532

文献标识码:A

文章编号:1000-0690(2016)03-0448-10

全新世是与人类关系最密切的一个时期,新仙女木事件结束后,在全球气温回暖的大背景下,北大西洋共发生了9次冷事件^[1,2],全新世气候的不稳定性在全球各地的地质记录中相继得到证实^[3],而在东亚季风环境影响下的中国中纬地区,类似的气候波动事件在石笋^[4]、湖泊^[5]、泥炭^[6]等沉积物中也有记录。然而,全新世期间东亚季风通过全球变化如何对中国沙漠施加影响的,这些气候事件与冰芯和海洋在时间上是否可以对比等相关问题还有待深入研究。显然,这一问题的探讨对于全新世全球变化与中国沙漠区域的东亚季风环境演变的理解具有重要意义。

萨拉乌苏河流域位于内蒙古鄂尔多斯高原毛乌素沙漠东南部边缘(图1)。该流域是中国北方上更新统河湖沼相标准地层萨拉乌苏组的命名地^[7]。流域上更新统-全新统多层序的风成沙丘砂、河湖沼相和古土壤沉积,忠实地记录了沙漠地区长期的风沙活动。最近10 a来萨拉乌苏流域环境变化的研究工作有了一些新进展^[8-12],其中Niu

et al.和Lü et al.对米浪沟湾MGS1层段的研究表明,全新世以来毛乌素沙漠曾经历了类似于D/O振荡式的东亚冬夏季风的波动^[11,13],其中的风成沙丘砂活动事件在时间和气候性质上与北大西洋11 000 a B.P.以来的寒冷波动基本一致。然而这中变化的客观存在仍然需要更多的地质材料进行佐证。

本文选取了邻近米浪沟湾剖面的滴哨沟湾剖面全新统——DGS1层段(以下称DGS1),以粒度分析结果为依据,结合年代测试结果,试图讨论萨拉乌苏流域全新世气候波动与季风环境变化之间的关系,以此加深对该区域环境演变过程的理解。

1 材料与方法

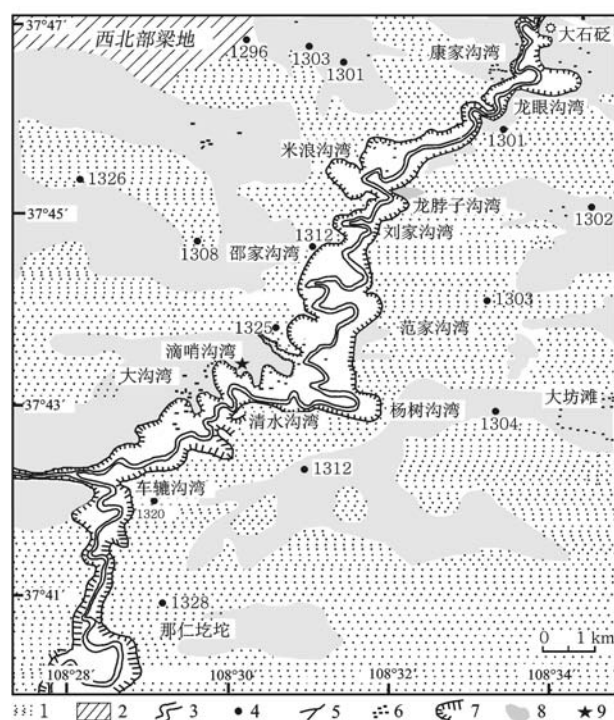
滴哨沟湾剖面位于萨拉乌苏河流域滴哨沟湾村的河流左岸,地理坐标为37°43'26.3"N, 108°31'2.3"E,剖面顶部海拔高度1 309 m(图1)。该剖面地层出露厚度为62.70 m(图2),时代包括全新统、上更新统和中更新统上部^[15]。DGS1的堆积深度为0~4.84 m,包括12层湖沼相(LS)、3层古流动沙

收稿日期:2014-12-05; **修订日期:**2015-03-16

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB955903)项目、国家自然科学基金(41471159)项目资助。[Foundation: National Basic Research Program of China (2013CB955903), National Natural Science Foundation of China (41471159).]

作者简介:舒培仙(1990-),男,安徽宣城人,博士研究生,主要研究方向为地表过程与第四纪环境演变。E-mail: shupeixian@163.com

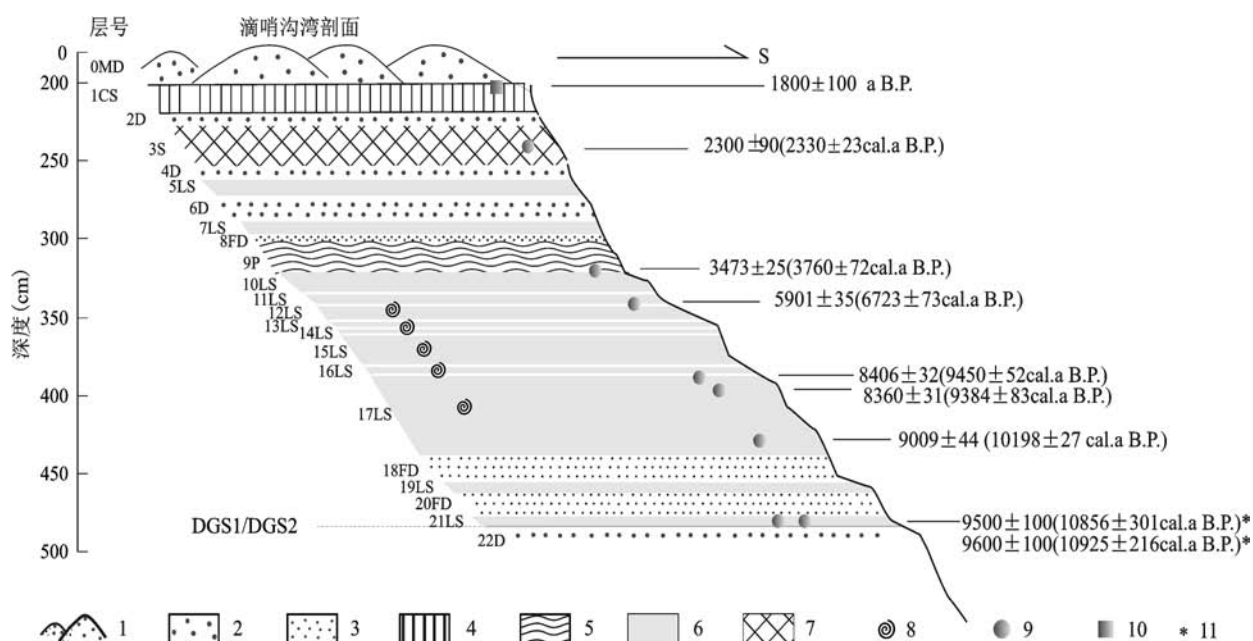
通讯作者:李保生,教授。E-mail: libsh@scau.edu.cn



1.沙漠; 2.梁滩地; 3.萨拉乌苏河; 4.海拔高度(m); 5.河系; 6.居民点; 7.陡崖; 8.湖沼相高原面; 9.DGS1

图1 研究区地理位置

Fig.1 The location of study area



1.现代流动沙丘砂; 2.古流动沙丘砂; 3.古固定半固定沙丘砂; 4.次生黄土; 5.泥炭; 6.湖相;
7.古土壤; 8.软体动物化石; 9. ^{14}C 测年; 10.OSL测年; 11.文献[14]

图2 DGS1 沉积序列

Fig.2 The sedimentary sequence of the DGS1

丘砂(D)、1层现代流动沙丘砂(0MD)、3层古固定-半固定沙丘砂(FD)、1层砂质古土壤(S)、1层泥炭(P)和1层次生砂质黄土(CS)。

DGS1 总共有 7 个样品的年代测试结果,其中 6 个常规 ^{14}C 年代(表 1)^[16]和 1 个 OSL 年代(见图 2)。 ^{14}C 年代由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 ^{14}C 实验室测定。OSL 年代由中国地质矿产部水文地质工程地质研究所光释光实验室完成。对 ^{14}C 年代采用 Calib7.0 程序中 Intcal 13 数据集^[16]进行校正(表 1)。由于这 6 个常规 ^{14}C 年代测试结果在第 4 个年代出现倒置,其余均符合地层层序律原则,将此点删除,并以剩下测定年代为控制点运用沉积速率线性内插方法建立该剖面的时间标尺(图 2)。同时滴哨沟湾剖面 DGS1 底部已有大量的绝对年代值^[15-17]。如图 2 所示,我们使用苏志珠等^[16]该层段底部(21LS) ^{14}C 年代测定结果作为全新世开始。剖面 1CS 顶部 OSL 年代为 $1\,800\pm 100\text{ a B.P.}$,最新的光释光年代结果^[18]与 ^{14}C 年代结果也吻合较好。

按照 1~2 cm 间隔对采集的 234 个样品进行了粒度分析。分析仪器为 Mastercizer 2000 M 型激光粒度分析仪,分析范围 0.02~2 000 μm ,误差 <2%。粒度单位采用 ϕ 值表示,转换公式为克伦宾^[19]制定的 $f=-\log_2 d$ (d 为粒径 mm)。平均粒径(M_z)、标准偏差(σ_1)、偏度(SK_1)和峰度(K_c)等粒度参数的计算采用 Folk and Ward^[16]所制定公式。

2 结果

2.1 粒径级配

根据粒度分析结果,绘制颗粒各粒级累积百

表1 滴哨沟湾DGS1层段 ^{14}C 年龄测定结果

Table 1 ^{14}C dating ages and calendar ages of some horizons in the DGS1

地层	深度(cm)	年代 (a B. P.)	测试材料	^{14}C 校正年代 (a B. P.)
3S	238	2300±90	有机质	2330±23
9P	320	3473±25	有机质	3760±72
12LS	342	5901±35	有机质	6723±73
16LS	388	8406±32	有机质	9450±52
17LS	398	8360±31	有机质	9384±83
17LS	432	9009±44	有机质	10198±27

分含量垂向变化图(图 3),可以直观地显示出不同粒级含量在不同地层层位和深度的分配关系与变化,亦可以显示出各层岩性特征。

DGS1 层段的底部 21LS 及上出现的湖沼相层,是该层段厚度最大的沉积相。由图 3 可知,整个湖沼相层平均含量最高组分是细砂,平均值为 33.07%,最高含量超过 60%;其次是粗粉砂,平均含量 23.54%;其余组分由高到低依次为极细砂、黏土、中砂和细粉砂,平均值依次为 14.26%, 12.89%, 11.01% 和 4.42%。不含极粗砂。

21LS 上覆 20FD 及剖面中 18FD 及 8FD,从沉积相来看属于古固定-半固定沙丘砂,其细砂、粗粉砂、极细砂、中砂平均含量依次降低但均超过 10%,分别为 41.56%, 21.52%, 13.97%, 10.01%;黏土和细粉砂平均含量分别为 8.32% 和 4.11%。

泥炭层细砂含量最高,平均值为 68.86%;其次是中砂,范围为 12.93%~26.46%,平均值为

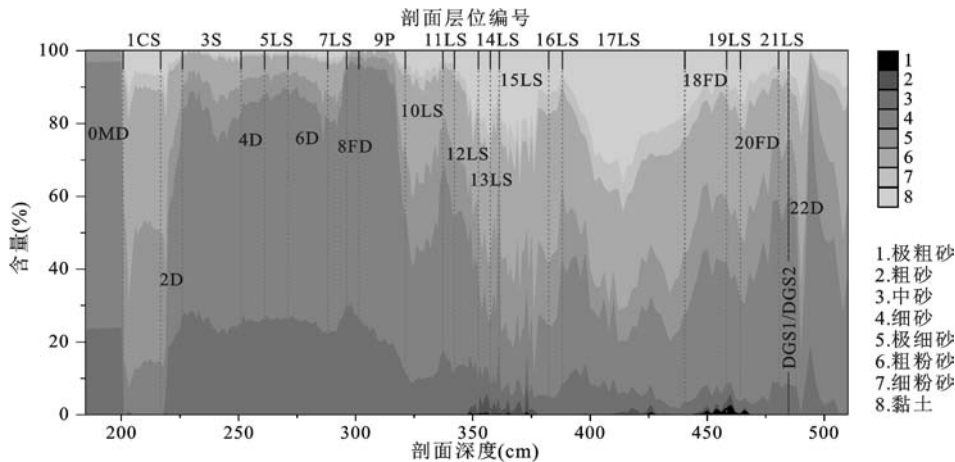


图3 DGS1层段粒度累计百分比含量垂向变化

Fig.3 The changes of grain-size cumulative percentage in the DGS1

20.93%;极细砂、粗粉砂平均含量为4.64%和4.38%;其它含量均低于1%。

流动沙丘砂包括0MD、6D、4D和2D这4个层位,从图3中可以看出细砂含量占优势,其平均含量达到58.92%,最高含量为73.91%;其次是中砂含量,平均值为24.45%;粗粉砂、极细砂的平均含量均不足10%;几乎不含黏土和细粉砂(不足1%)。这说明了流动沙丘砂主要以细砂和中砂为主,相较于前述的古固定-半固定沙丘砂,表现出粗颗粒组分(中砂)含量的增加,细颗粒组分(黏土和细粉砂)含量的减少。

剖面2.5~2.25 m深度范围是砂质古土壤层(3S),粒级组分由高到低依次是细砂、中砂、粗粉砂和极细砂,分别为56.67%,25.34%,8.27%和8.07%。黏土和细粉砂含量相对增加,平均值近1%。可以看出,该层古土壤的发育程度较低。

现代流动沙丘砂之下的次生黄土(1CS)的粗粉砂含量最高,平均含量为39.69%,最高超过50%;其次为极细砂,平均含量为35.29%;细砂、黏土、细粉砂的含量依次降低,平均值依次为13.02%,7.21%,4.46%;中砂、粗砂和极粗砂平均含量均不足1%。

2.2 粒度参数变化

表2是各沉积相的粒度参数平均值及范围。平均粒径以流动沙丘砂、泥炭和砂质古土壤较粗,古固定-半固定沙丘砂次之,湖沼相和次生黄土最

细;由泥炭到流动沙丘砂和砂质古土壤再到次生黄土和湖沼相,分选性由较好变差;偏度值(SK_1)均为正偏且在泥炭和流动沙丘砂中最低,由古固定-半固定沙丘砂、湖沼相、砂质古土壤和次生黄土中逐渐升高;峰度值(K_c)在流动沙丘砂、次生黄土和砂质古土壤均值较湖沼相、古固定-半固定沙丘砂和泥炭大,说明沉积物堆积后期混入了其他的颗粒。

从垂直方向上看,湖沼相、次生黄土与沙丘砂等的 $M_z(\phi)$ 、 $\sigma_1(\phi)$ 、 SK_1 、 K_c 构成一峰谷交替的曲线,由沙丘砂至上覆的湖沼相, $M_z(\phi)$ 、 $\sigma_1(\phi)$ 、 SK_1 值相应增大, K_c 相应减小(图4)。DGS1层段粒度特征参数剖面垂向上变化呈现出与沉积旋回相对应的粒度旋回。

3 讨论

3.1 DGS1层段的堆积过程

萨拉乌苏河流域地处毛乌素沙漠南缘,是东亚季风变化的敏感区,现代该地区冬春季节盛行偏北和西北风向的冬季风,风沙流的蚀积活动加剧;在暖湿的夏秋季节,来自东南的东亚夏季风盛行,降雨和流水作用增强,地表过程以沙丘固定成壤和河湖沉积为主要营力。当然现代毛乌素沙漠南缘,沉积相的变化还会受植被覆盖和区域水热组合状况的影响。但是,近年来一些研究者采用不同气候代用指标探讨了该地区沉积序列及其形成的古气候

表2 DGS1层段各沉积相粒度参数特征分布

Table 2 Grain size characteristic parameters in the DGS1 segment of each sedimentary facies

沉积相(样品数)	特征参数	$M_z(\phi)$	$\sigma_1(\phi)$	SK_1	K_c
流动沙丘砂(37)	平均值	2.55	0.97	0.29	1.43
	范围	2.21~3.36	0.51~1.68	0.01~0.45	0.94~1.70
固定半固定沙丘砂(22)	平均值	3.89	1.76	0.32	1.03
	范围	2.27~5.12	0.53~2.51	0.02~0.51	0.92~1.24
古土壤(25)	平均值	2.58	1.00	0.34	1.42
	范围	2.4~2.87	0.81~1.25	0.23~0.43	1.28~1.61
次生黄土(19)	平均值	4.58	1.46	0.36	1.44
	范围	4.25~5.27	1.15~2.10	0.22~0.38	1.22~1.51
湖沼相(111)	平均值	4.28	2.13	0.32	1.13
	范围	2.33~6.38	0.81~3.25	0.09~0.53	0.65~1.80
泥炭(20)	平均值	2.54	0.71	0.14	1.07
	范围	2.33~3.47	0.53~1.69	0.03~0.51	0.94~1.74
全剖面(234)	平均值	3.67	1.62	0.31	1.22
	范围	2.21~6.38	0.52~3.25	0.01~0.53	0.65~1.80

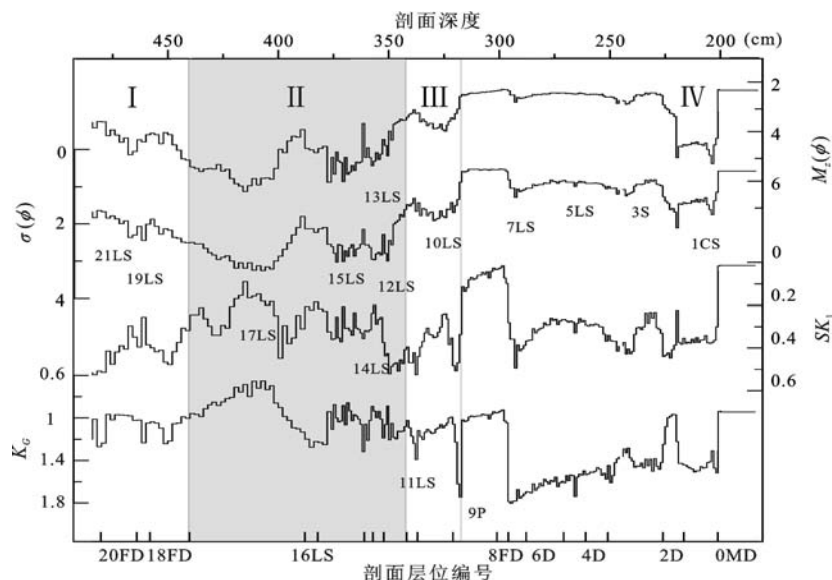


图4 DGS1 粒度特征参数变化及其所反映的全新世气候波动

Fig.4 The changes of grain-size parameters M_z , σ_1 , SK_1 and K_ϕ in the DGS1

因素,认为千年尺度的风成砂与古土壤/湖沼相变主要是东亚冬夏季风冷暖波动的结果^[9-13,20-24]。

全新世早期,太阳辐射量增加,东亚夏季风增强^[25,26],降水增多,地势低洼之处开始汇水成湖,剖面中21LS湖沼相层的出现正是这一过程的体现,但其厚度不大且与固定半固定沙丘砂相互交替,说明此时的湖泊面积较小,当冬季风增强之时,湖泊面积缩小并发育固定半固定沙丘砂。在东亚夏季风强盛时期,特别是全新世大暖期,毛乌素沙漠水热条件好,此时中国东部沙区地表景观上表现为高地普遍发育砂质古土壤,地势低洼之处形成湖泊^[27,28],鹿化煜等^[29]最新研究表明,大暖期时期毛乌素沙漠几乎全部固定。那么DGS1中所见厚度1.5 m的湖沼相沉积就不足为奇。但是干旱—半干旱地区的表层物质堆积松散,在强风天气条件下,地表粉尘物质容易被风吹扬进入大气环流,在近源或远源地区沉积下来,位于粉尘源区的湖泊作为粉尘“收集器”,将会接纳区域性的较粗的颗粒物质。因此,在干旱—半干旱地区,风成输入组分成为封闭湖泊沉积物的主要来源之一^[30]。研究区大风天气频繁,湖泊沉积物的粒度组成中必然有一部分来自风成输入组分。选取DGS1湖沼相沉积层(13LS、15LS、17LS和21LS)中石英颗粒表面进行电镜扫描,发现其磨圆度较好,颗粒表面无硅质沉淀并显现出麻坑(图5),显示出其典型风成特征。这就说明了DGS1中粗颗粒物质的风成成因。当然湖泊流

水作用,会带入大量的细颗粒物质,使平均粒径有不同程度的细化,故湖沼相的 $M_z(\phi)$ 和 $\sigma_1(\phi)$ 值均较大,显示了颗粒变细和分选变差。

剖面深度3.1 m之上地层不同类型沙丘砂的出现是砂源供给、风力大小和植被覆盖的综合结果^[31]。研究地点所处的毛乌素沙漠至少在中更新世就以形成^[32,33],而萨拉乌苏流域的地层中保存着非常发育的末次冰期的沙丘砂^[34],因而研究地点的沙丘砂补给充足。一般来说,该地区沙丘可以通过两种主要方式形成。一种情况是,干旱的气候导致地表植被覆盖度降低,先前固定或半固定的沙丘活化,沙丘表层砂在风力作用下开始搬运移动,导致沙丘移动或者新沙丘形成。另一种情况是,河流或湖泊等水动力搬运携带外来砂粒,当气候变干,湖泊/河流面积缩小,砂质沉积物在湖滨与河边等地貌部位近源堆积,形成沙丘。早全新世的古固定—半固定沙丘砂的出现应该就是第二种情况下的砂质沉积物。而在全新世大暖期后期,伴随着冬季风增强和夏季风的减弱,该地降水逐渐减少,滴哨沟湾古湖逐渐萎缩,研究地点成为湖滨沼泽地带,强劲的风力所携带的粗砂物质在跃移过程中被沼泽水草阻挡捕获,并受潜育环境影响,剖面厚层湖沼相结束之后出现的泥炭层(9P)可能是这种过渡环境的产物,从而在粒度特征上表现出较粗的平均粒径。在冬季风仍占优势,夏季风也可以影响的形势下,湖泊干涸,风力作用之

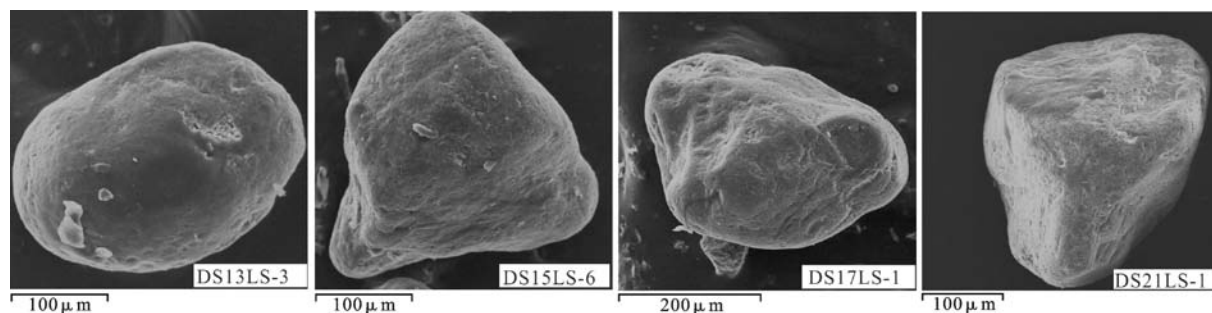


图5 DGS1湖沼相沉积中粗颗粒石英砂粒电镜扫描

Fig.5 The surface microstructure of quartz grains from the lacustrine facies in the DGS1

下砂质物质开始堆积,不多的降水量维持着沙丘表层植被,形成固定-半固定沙丘,这种类型的沙丘粒度组成中粉砂和黏土含量较高,平均粒级偏粗。而当冬季风对该地区起绝对作用,这种环境持续发展,地表植被盖度将大大降低,导致砂质物质大量富集于地表,形成充足砂源,在强劲风力作用下,搬运携带粗粒的碎屑形成地表风沙流,并强迫更多细粒形成尘暴流失,同时抑制黏粒的滋生,使得颗粒粗化,遇到阻碍堆积形成流动沙丘,这一过程就是前述沙丘形成的第一种模式。DGS1中流动沙丘砂粒度平均粒径变粗, $M_z(\phi)$ 值在曲线上表现为低谷与这种环境有密切的关系。当西伯利亚-蒙古高压进一步减弱到冬季风力小于起沙风力(5 m/s)的时期,降尘的发生频率有可能大为增加,次生黄土1CS就是这种气候的直接后果。

据此我们可以认为,DGS1各沉积相的粒度特征旋回实际上是全新世以来多次冬夏季风的交互演替过程的气候-地质记录。

3.2 DGS1层段的粒度记录的全新世气候波动

第四纪以来万年至千年尺度的东亚冬夏季风是两个对立统一的主体气候系统,二者存在显著的互为消长的关系^[8],其最为直观的后果即是气候地层学记录。滴哨沟湾剖面的沉积序列应该也真实的记录了这一气候变化。

粒度在黄土等风成沉积物研究中被广泛用作东亚冬季风的指标^[35]。近年来的许多研究也表明,湖泊沼泽沉积物粒度组成受风场动力影响较大,能够很好的记录区域强沙尘/粉尘事件^[30,36]。对风成砂和湖沼相沉积物,粒度均可以作为有效的东亚季风气候代用指标^[37]。

这一认识出发,DGS1全新世气候可以分为以下4个阶段:

第1阶段,全新世早期气候好转,21LS-18FD(11 020~10 290 a B.P.),平均粒径 $M_z(\phi)$ 逐渐变细,粒度组分中含沙量逐渐降低,黏土含量增高。气候比末次冰期明显好转,冬季风减弱,夏季风增强,沙漠主要以古固定-半固定沙丘为主,温度升高,降水增加,局部地区形成了暂时性湖泊和沼泽,湖沼相发育。但暖湿程度不如后面的鼎盛期。同时该层段常见有较多淡水螺壳,主要为平卷螺和塔螺贝壳^[16],另外在地层中也发育冻融卷曲或融冻褶皱现象^[16],表明此阶段温度仍然较低,气候相对干凉;该阶段沉积物碳酸盐含量极低,无机碳酸盐碳同位素组成相对偏轻^[38],表明此阶段主要以河流淡水为主,气候逐渐升高,但降雨量不明显。此阶段据祁连山敦德冰芯记录,冰后期升温开始于10.75 ka B.P.以前,气候发生多次震荡^[39]。其中,18FD(10 290~10 580 a B.P.)/20FD(10 670~10 930 a B.P.)所代表的冷事件可与Bond等^[2]发现的北大西洋冷事件中的10.3 ka B.P.对比。

第2阶段,全新世鼎盛期,17LS-12LS(10 290~6 590 a B.P.),平均粒径达到最高点,粒度组分里的黏土含量也达到最高值。在地层上灰白色湖沼相堆积并发育大量淡水腹足类化石为主要特色。软件动物一般迁徙能力很弱,生态环境的阻隔使其适应能力较差,对生活环境的变化较为敏感,如水温、盐度、酸碱度、底质等的要求比较严格,其适应能力有一定范围。经鉴定该层段软体动物主要为凸旋螺(图6)。目前其最南分布于中国广东、云南,国外分布于东南亚一带,最北分布于陕西。这一物种的出现反映了较温暖、湿润的生物气候环境。说明DGS1层段湖沼相沉积的形成时具有比较温暖、湿润的气候环境。同时该层段淡水腹足类化石属种,有许多幼体标本,它们常以绿色水生

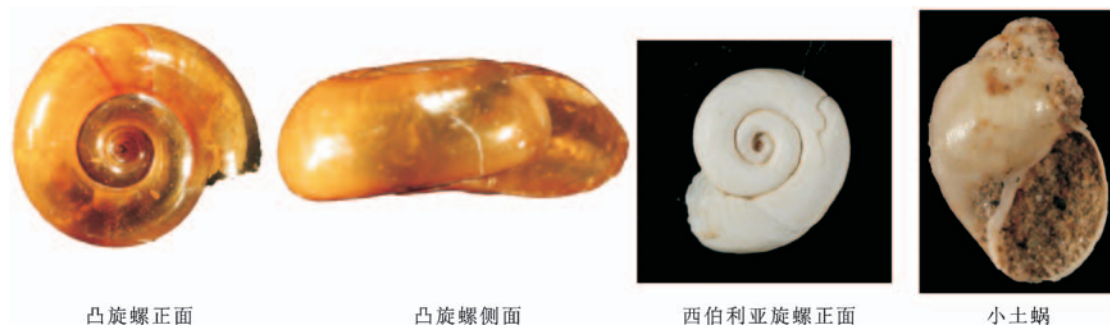


图6 DGS1湖沼相沉积中的淡水类腹足类动物化石

Fig.6 The fossils of the freshwater gastropods from the lacustrine facies in the DGS1

植物、藻类为食,其在春季产卵孵化后经历过迅速繁殖,但绝大多数可能在春夏之交时受到流水堆积或者更可能是受到季节性的沙尘暴气候的影响而夭折。据此我们认为该时期东亚夏季风强盛,但是区域性的风沙活动依然存在。而对DGS1有机质、碳酸盐和碳酸盐碳氧同位素等进行研究表明^[38],该层段有机质、碳酸盐含量快速上升,碳酸盐碳氧同位素组成也明显偏重,表明该段时期滴哨沟湾古湖泊扩张到最大,温度和降雨量同时增加,但是高温导致了蒸发作用的加强,蒸发降雨比值增大,有效湿度不高,植被状况中等,这就证明该时期风沙活动存在的可能性。此鼎盛期在中国多处地点均有记录,如方修琦等^[39]根据中国全新世气温集成序列资料认为全新世鼎盛期出现在8~6.4 ka B.P.

第3阶段,大暖期向寒冷期转变的波动期,11LS-10LS(6 590~3 760 a B.P.)。整个层段平均含砂量比大暖期期间降低,颗粒变粗。有资料显示全新世高温期的晚期气候更不稳定,表现为快速降温变干过程^[40]。该层段腹足类化石中西伯利亚旋螺 *Gyraulus sibiricus* (Dunker)、小土蜗 *Galba pervia* (Martens)组合的出现,亦反映了较寒冷、干旱的生物气候环境。这是因为这些种类一般具有耐寒冷的能力,能适应大陆性气候环境,从目前已知种的地理分布看,主要生活在华北区、蒙新区、青藏区(即古北界区域内),它们系典型的古北界种类。同时该阶段有机质含量较高,碳酸盐含量则快速下降,碳酸盐碳氧同位素组成进一步偏重,表明了温度和降雨量均有所下降。

第4阶段,降温不稳定的沙漠化频繁变化时期,9P-0MD(3 760~0 a B.P.),此阶段粒度颗粒最粗,分选最好。以沙丘砂堆积为特点的干冷多风

气候期为主体,且具有不稳定性,期间发育的2D、4D、6D是气候急剧变冷的结果。这与方修琦等^[39]认为晚全新世4 ka B.P.以来气候为相对较冷的结果相一致。另外,其中0MD(0~1 800 a B.P.)可与北大西洋冷事件0.4~1.4 ka B.P.对比,6D(2 820~3 140 a B.P.)可与北大西洋冷事件2.8 ka B.P.对比,9P(3 380~3 760 a B.P.)可与北大西洋冷事件4.2 ka B.P.对比;次生黄土1CS(1 800~1 980 a B.P.)所代表的气候回暖期与GISP2^[41]和方修琦等^[3]的气温集成序列显示的小冰期之前的1 ka B.P.前后有一次短暂的温暖期相一致。

4 结论

本文以滴哨沟湾剖面全新统DGS1段为研究对象,依据测年结果,通过粒度分析,结合腹足类动物化石和石英砂粒表层结构电镜扫描。我们得出如下结论:

1) DGS1的粒级配制中,除次生黄土外,其余沉积相均以细砂含量最高。从粒度参数来看,流动沙丘砂、泥炭、砂质古土壤、古固定-半固定沙丘砂到湖沼相和次生黄土颗粒逐渐变细,分选逐渐变差,在剖面垂直方向上形成与沉积旋回相对应的粒度旋回。

2) 湖沼相沉积的石英颗粒表面电镜扫描,发现其磨圆度较好,表面无硅质沉淀并显现出麻坑,显示出其典型风成特征,说明DGS1中湖相沉积时毛乌素沙漠仍存在风沙活动。

3) 通过比较剖面有机碳同位素和动物化石记录的气候变化,认为DGS1粒度记录了全新世以来多次冬夏季风交互演替的过程。其全新世气候可分为4个阶段:即全新世早期气候好转期、全新世鼎盛期、大暖期向寒冷期转变的波动期和降温

不稳定的沙漠化频繁变化时期。

参考文献(References):

- [1] Bond G, Showers W, Elliot M et al. The North Atlantic's 1-2 Kyr Climate Rhythm: Relation to Heinrich Events, Dansgaard/Oeschger Cycles and the Little Ice Age[M]// P U Clark et al. Mechanisms of Global Climate Change at Millennial Time Scales. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1999.
- [2] Moros M, Emeis K C, Risebrobakken B et al. Sea surface temperatures and ice rafting in the Holocene North Atlantic: climate influences on northern Europe and Greenland[J]. *Quat. Sci. Rev.*, 2004, 23(3): 2113-2126
- [3] Bond G, Showers W, Cheseby M et al. A Pervasive millennial scale cycle in North Atlantic Holocene and Glacial climates[J]. *Science*, 1997, 278(3): 1257-1266.
- [4] Dykoski C, Edwards R, Cheng H et al. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1): 71-86.
- [5] Chen F H, Cheng B, Zhao Y et al. Holocene environmental change inferred from a high-resolution pollen record, Lake Zhuyeze, arid China[J]. *Holocene*, 2006, 16(5): 675-684.
- [6] Zhou W J, Lu X F, Wu Z K et al. Peat record reflecting Holocene climatic change in the Zoigê Plateau and AMS radiocarbon dating. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(1): 66-70.
- [7] 闵隆瑞, 迟振卿. 对中国第四系中统划分方案的回顾与讨论[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(02): 101-107. [Min Longrui, Chi Zhenqing. Discussion on Plans of Dividing Quaternary to Series in China. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(2): 101-107.]
- [8] Li B S, Zhang D D, Jin H L et al. Paleo-monsoon activities of Mu Us Desert, China since 150 ka B.P.—A study of the stratigraphic sequences of the Milangouwan Section, Salawusu River area[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2000, 162(1-2): 1-16.
- [9] Wen X H, Li B S, Zheng Y et al. Climate variability in the Salawusu River valley of the Ordos Plateau (Inner Mongolia, China) during Marine Isotope Stage 3[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2009, 24(1): 61-74.
- [10] Du S H, Li B S, Chen M H et al. Kiloyear-scale climate events and evolution during the Last Interglacial, Mu Us Desert, China[J]. *Quaternary International*, 2012, 263(5): 63-70.
- [11] Lu Y X, Li B S, Wen X H et al. Millennial-centennial scales climate changes of Holocene indicated by magnetic susceptibility of high-resolution section in Salawusu River valley, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2010, 20 (3): 243-251.
- [12] 王丰年, 李保生, 王江龙, 等. 萨拉乌苏河流域MGS2层段粒度与CaCO₃记录的千年尺度气候变化[J]. *地理科学*, 2012, 32(5): 596-602. [Wang Fengnian, Li Baosheng, Wang Jianglong et al. Millennium-scale Climate Variations from the Record of Grain-size and CaCO₃ During the Pleniglacial in the Salawusu River Valley, China. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(5): 596-602.]
- [15] Niu D F, Li B S, Wang F N et al. Cold events of Holocene indicated by primary elements distribution of the high-resolution sand dunes in the Salawusu River Valley[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(1): 26-36.
- [14] 苏志珠, 董光荣, 靳鹤龄. 萨拉乌苏组地层年代学研究[J]. *地质力学学报*, 1997, 3(4): 92-98. [Su Zhizhu, Dong Guangrong, Jin Heling. A Geochronological Study of the Salawusu Strata in North China. *Journal of Geomechanics*, 1997, 3(4): 92-98.]
- [15] 董光荣, 李保生, 高尚玉. 由萨拉乌苏河地层看晚更新世以来毛乌素沙漠的变迁[J]. *中国沙漠*, 1983, 3(2): 9-14. [Dong Guangrong, Li Baosheng, Gao Shangyu. The Case Study of the Vicissitude of Mu Us Sandy Land Since the Late Pleistocene According to the Salawusu River Strata. *Journal of Desert Research*, 1983, 3(2): 9-14.]
- [16] Reimer P J, Edouard B, Bayliss A et al. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50 000 Years cal B.P.[J]. *Radiocarbon*, 2013, 55(4): 1869-1887.
- [17] 靳鹤龄, 李明启, 苏志珠, 等. 萨拉乌苏河流域地层沉积时代及其反映的气候变化[J]. *地质学报*, 2007, 81(3): 307-315. [Jin Heling, Li Mingqi, Su Zhizhu et al. Sedimentary Age of Strata in the Salawusu River Basin and Climatic Changing. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(3): 307-315.]
- [18] Liu K, Z P Lai. Chronology of Holocene sediments from the archaeological Salawusu site in the Mu Us Desert in China and its palaeoenvironmental implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 45: 247-255.
- [19] Folk P L, Ward W D. Brazos Reviver bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27(3): 3-26.
- [20] Krumbein W C, E Aberdeen. The Sediments of Barataria Bay[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1937, 7(1): 3-17.
- [21] 杜恕环, 李保生, David Dian Zhang, 等. 萨拉乌苏河流域MGS5层段CaCO₃记录的末次间冰期东亚季风与沙漠环境演化[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(11): 1187-1193. [Du Shuhuan, Li Baosheng, David Dian Zhang et al. The Last Interglacial East Asian monsoon and Desert environment evolution by Trace CaCO₃ record of the MGS5 Segment in the Salawusu River Valley, China. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(11): 1187-1193.]
- [22] 牛东风, 李保生, 温小浩, 等. 萨拉乌苏河流域MGS1层段微量元素记录的全新世ka尺度的气候变化[J]. *地质学报*, 2011, 85(2): 300-308. [Niu Dongfeng, Li Baosheng, Wen Xiaohao et al. The Holocene ka-Scale Climate Variation Indicated by Trace Elements of the MGS1 Segment in the Salawusu River Valley, China. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(2): 300-308.]
- [23] Porte S C, Zhou W. Synchronism of Holocene East Asian monsoon variations and North Atlantic drift-ice tracers[J]. *Quaternary Research*, 2006, 65(3): 443-449.
- [24] 苏志珠, 董光荣, 李小强, 等. 晚冰期以来毛乌素沙漠环境特征的湖沼相沉积记录[J]. *中国沙漠*, 1999, 19(2): 9-14. [Su Zhizhu,

- Dong Guangrong, Li Xiaoqiang et al. The Lake-Swamp Sediment Records on the Environmental Characteristics of Mu Us Desert since the Late Glacial Epoch. *Journal of Desert Research*, 1999,19(2):9-14.]
- [25] Wang Y J, Cheng H. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate[J]. *Science*, 2005,308(23): 854-857.
- [26] An Z S. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(5): 171-187.
- [27] Li S H, J M. Sun, B Li. Holocene environmental changes in central Inner Mongolia revealed by luminescence dating of sediments from the Sala Us River valley[J]. *Holocene*, 2012,22(4): 397-404.
- [28] 裘善文,李取生,夏玉梅. 东北平原西部沙地古土壤与全新世环境变迁[J]. *第四纪研究*, 1992,(3):224-232.[Qiu Shanwen, Li Qusheng, Xia Yumei. Paleosols of Sandy Lands and Environmental Changes in the Western Plain of Northeast China during the Holocene. *Quaternary Sciences*, 1992,(3):224-232.]
- [29] Lu H Y, Yi S W, Xu Z W et al. Chinese deserts and sand fields in Last Glacial Maximum and Holocene Optimum. *Chinese Science Bulletin*, 2013,58(23):2775-2783.
- [30] Qiang M R, Liu Y Y, Jin Y X et al. Holocene record of eolian activity from Genggahai Lake, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014,41 (2): 589-595.
- [31] Lancaster N. *Geomorphology of Desert Dunes*[M]. London and New York: Routledge, 1995.
- [32] 高尚玉,张宇田,曹继秀,等. 榆林风成沙-黄土-沙质古土壤剖面古地磁年代及其意义[C]//中国地球物理学会. 1994年中国地球物理学会第十届学术年会论文集. 北京:地质出版社, 1994:1.[Gao Shangyu, Zhang Yutian, Cao Jixiu et al. The Paleomagnetic dating and significance of Yulin Aeolian Sand-Loess-Paleosols of Sandy//The geophysical society of China. 1994 the Chinese geophysical society the 10th academic conference proceedings. Beijing: Geological publishing, 1994:1.]
- [33] Sun J M, Ding Z L. 580 000-year environmental reconstruction from aeolian deposits at the Mu Us Desert margin, China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1999,18(12):1351-1364.
- [34] 李保生,董光荣,吴正,等. 我国北方上更新统城川组的建立[J]. *地质论评*, 1993,39(2):91-100.[Li Baosheng, Dong Guangrong, Wu Zheng et al. The Establishment Upper Pleistocene Chengchuan Formation in Northern China. *Geological Review*, 1993,39 (2):91-100.]
- [35] Xiao J L, Porter S C, An Z S et al. Grain-Size Of Quartz as an Indicator Of Winter Monsoon Strength on the Loess Plateau Of Central China during the Last 130 000-Yr[J]. *Quaternary Research*, 1995,43(1): 22-29.
- [36] 金章东,王苏民,沈吉,等. 岱海地区近400年来的“尘暴”事件——来自岱海沉积物粒度的证据[J]. *湖泊科学*, 2000,12(3): 193-198. [Jin Zhangdong, Wang Sumin, Shen Ji et al. Dust-storm Events in Daihai Lake Area, Inner Mongolia During the Past 400 Years: Evidence from Grain-size Analysis of Lake Sediments. *Journal of Lake Sciences*, 2000,12(3):193-198.]
- [37] 李志忠,凌智永,陈秀玲,等. 新疆伊犁河谷晚全新世风沙沉积粒度旋回与气候变化[J]. *地理科学*, 2010,30(4):613-619.[Li Zhizhong, Ling Zhiyong, Chen Xiuling et al. Late Holocene Climate Changes Revealed by Grain-size Cycles in Takemukul Desert in Yili of Xinjiang. *Scientia Geographica Sinica*, 2010,30 (4):613-619.]
- [38] 赵琦,樊荣,李保生,等. 内蒙古萨拉乌苏河流域滴哨沟湾全新世早-中期湖沼相沉积的地球化学古气候响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013,33(4):103-112.[Zhao Qi, Fan Rong, Li Baosheng et al. Geochemical Responses to Palaeoclimate: Evidence from the Early-mid Holocene Lake Deposits at Dishaogouwan Section in the Salawusu Catchment of Inner Mongolia. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013,33(4):103-112.]
- [39] 方修琦,侯光良. 中国全新世气温序列的集成重建[J]. *地理科学*, 2011,31(4):385-393.[Fang Xiuqi, Hou Guangliang. Synthetically Reconstructed Holocene Temperature Change in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2011,31(4):385-393.]
- [40] 陈云,李铮华,赵景波,等. 全新世高温期气候不稳定性记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999,19(3):97-103.[Chen Yun, Li Zhenghua, Zhao Jingbo et al. Climatic in Stability Records of Megathermal Period in Holocene. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999,19(3):97-103.]
- [41] Groote P M, Stuiver M, White J W C et al. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland icecores[J]. *Nature*, 1993,366(5):552-554.

Climate Variations Recorded by the Grain-size from the DGS1 Segment in the Southeast of China's Mu Us Desert During the Holocene

Shu Peixian^{1,2}, Li Baosheng^{1,2}, Niu Dongfeng¹, Wang Fengnian³,
Wen Xiaohao¹, Si Yuejun⁴, Chen Qiong¹

(1.School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, Guangdong, China; 2.State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 3.Tourism department, Huizhou University, Huizhou 516007, Guangdong, China; 4.School of Geography and Planning, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, Guangxi, China)

Abstract: The DGS1 segment in the Dishaogouwan section from the Salawusu River valley is a typical stratum to study the climate variations in the Holocene. Based on the dating ages and analysis of the grain-size features within the DGS1, we find that the particle gradually becomes finer but the sorting rate becomes poorer from mobile dune sands, peat, paleosols, semi-fixed sand dunes to the lacustrine facies and secondary loess; the grain-size parameter values of $M_z(\phi)$, $\sigma_1(\phi)$, SK_1 in the dune sands are lower than those in the lacustrine facies or secondary loess, and the K_c value shows opposite trends; the M_z ranges from 2.26 to 3.36 (average 2.55) in the dune sands, 2.33 to 6.33 (average 4.28) in the lacustrine facies and 4.25 to 5.27 (average 4.58) in the secondary loess; the $\sigma_1(\phi)$ ranges from 0.51 to 2.51 (average 0.97) in the dune sands, 0.81 to 3.25 (average 2.13) in the lacustrine facies and 1.10 to 2.46 (average 1.46) in the secondary loess; the SK_1 ranges from 0.01 to 0.45 (average 0.29) in the dune sands, 0.09 to 0.53 (average 0.32) in the lacustrine facies and 0.22 to 0.38 (average 0.36) in the secondary loess; the K_c ranges from 0.92 to 1.70 (average 1.42) in the dune sands, 0.65 to 1.80 (average 1.13) in the lacustrine facies and 1.22 to 1.51 (average 1.44) in the secondary loess. They display distinct variations that correspond to the sedimentary changes. The surface microstructure of the quartz grains in the lacustrine facies under the electron microscope scanning shows typical aeolian characteristics with good roundness, without precipitated silica, but with pits on the surface. Together with the freshwater gastropod fossils discovered in the stratigraphical layers, we suggest that the grain-size cycles in the DGS1 segment actually reflect the climate variations in the alternation of East Asian winter and summer monsoons in the Holocene, and the climate of the Holocene can be divided into four stages: the warming period of the Early Holocene; Holocene heyday; the fluctuation period from the Megathermal to cold; and the cooling period of instability and desertification. The climate changes in the DGS1 during the Holocene correspond well to those found in the North Atlantic and some places in China, which probably results from the global climate changes in the Holocene.

Key words: Dishaogouwan section; grain-size; climate change; Holocene; Mu Us Desert