

微量元素记录的毛乌素沙漠全新世气候波动^① ——以萨拉乌苏流域 DGS1 层段为例

牛东风¹ 李保生^{1,2} 王丰年³ 陈 琼¹ 舒培仙¹ 温小浩¹ 陈 敏¹

(1.华南师范大学地理科学学院 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 西安 710061;3.惠州学院 广东惠州 516007)

摘 要 选取毛乌素沙漠东南缘萨拉乌苏河流域具有代表性的滴哨沟湾剖面全新统(DGS1层段),结合微量元素与测年分析结果,探讨了该地全新世千年尺度的气候波动。结果表明,P、V、Cu、Zn、Sr、Ni、As、Cr、Pb属于易迁移—较稳定元素,其含量在沉积相中主要呈现为古土壤<沙丘砂<湖沼相,Co、Rb、Nb、Ba、Cl、Zr属于稳定—惰性元素,主要呈现为古土壤>沙丘砂>湖沼相,说明沙丘砂是冬季风主导下的沉积,古土壤和湖沼相是夏季风主导下的沉积。以Rb和Sr两种元素在垂向上峰谷交替的变化特征为依据,将DGS1记录的全新世气候分为升温期(11 000~10 130 a B.P.)、大暖期(10 130~6 590 a B.P.)、降温期(6 590~3 760 a B.P.)和寒冷期(3 760~0 a B.P.)四个阶段,这与国内外的相关研究结果一致,表明萨拉乌苏河流域全新世的气候变化是全球环境变化影响下的结果。

关键词 毛乌素沙漠 滴哨沟湾剖面 DGS1 层段 微量元素 全新世气候变化

第一作者简介 牛东风 男 1978年出生 博士 实验师 第四纪地质学 E-mail: 33845410@qq.com

通讯作者 李保生 男 教授 E-mail: libsh@senu.edu.cn

中图分类号 P92 **文献标识码** A

全新世因人类社会的形成和现今自然地理环境的奠定而成为过去全球变化研究的热点,是第四纪最后一次盛冰期结束至今的温暖期。在全球气温变暖的大背景下,北大西洋共发生了9次冷事件^[1-2],揭示了千百年尺度的气候变化周期。深海^[3]至内陆沉积^[4]和东亚季风影响下的中国冰芯^[5]、湖泊^[6]、石笋^[7]、沙地^[8]、黄土^[9]等也显著体现了这些不稳定性特征。然而,全新世期间东亚季风如何影响中国沙漠—黄土的沉积体系,其记录的气候事件及发生时间是否可以与海洋和其它内陆沉积相对比等相关问题还有待深入研究。这对于探讨全新世的全球气候变化与中国沙漠区东亚季风环境演变的规律和二者之间的相关性具有重要意义。

位于毛乌素沙漠东南边缘的萨拉乌苏河流域是中国北方上更新统河湖相标准地层萨拉乌苏组的命名地^[10],其上更新统一全新统为由风成砂、河湖相和古土壤等沉积相叠覆组成的沉积系列,详细记录了沙漠地区千百年尺度风沙活动的扩张与间断^[11-13]。在该地区,此类研究也取得了重要进展,认为全新世以来毛乌素沙漠曾经历了类似于D/O振荡式的东亚冬季风的波动^[14-15]。然而这种变化的客观存在仍然

需要更多的地质材料进行佐证。鉴于此,本文选取临近米浪沟湾剖面的滴哨沟湾剖面全新统的DGS1层段(以下称DGS1),以微量元素为指标,结合年代测试结果,探讨萨拉乌苏流域全新世沙漠演化与季风环境变化之间的关系,以期加深对该区域环境演变过程的理解。

1 材料与方法

滴哨沟湾剖面位于毛乌素沙漠东南萨拉乌苏河滴哨沟湾左岸,37°43'26.3" N,108°31'2.3" E,剖面顶部海拔1 309 m(图1)。该剖面地层出露厚度62.70 m,时代自上而下属全新统、上更新统和中更新统顶^[16]。DGS1的堆积厚度4.84 m,包括湖沼相(LS)12层、古流动沙丘砂(D)3层、古固定—半固定沙丘砂(FD)3层、现代流动沙丘(OMD)1层、砂质古土壤(S)1层、泥炭(P)1层及次生黄土(CS)1层(图2)。湖沼相以青灰色或灰白色细砂质粉砂为主,交织细小植物根系,质地硬,内有较多软体动物化石。古流动沙丘为灰黄色细沙,分选均匀,较松散。古固定—半固定沙丘砂以灰黄色极细砂质细砂为主,分选好,较松散。砂质古土壤表现为棕灰色含粉沙的细沙,较紧

^①国家重点基础研究发展计划(编号:2013CB955903)与华南师大青年教师培育基金(编号:13KJ12)联合资助

收稿日期:2015-01-14;收修改稿日期:2015-03-09

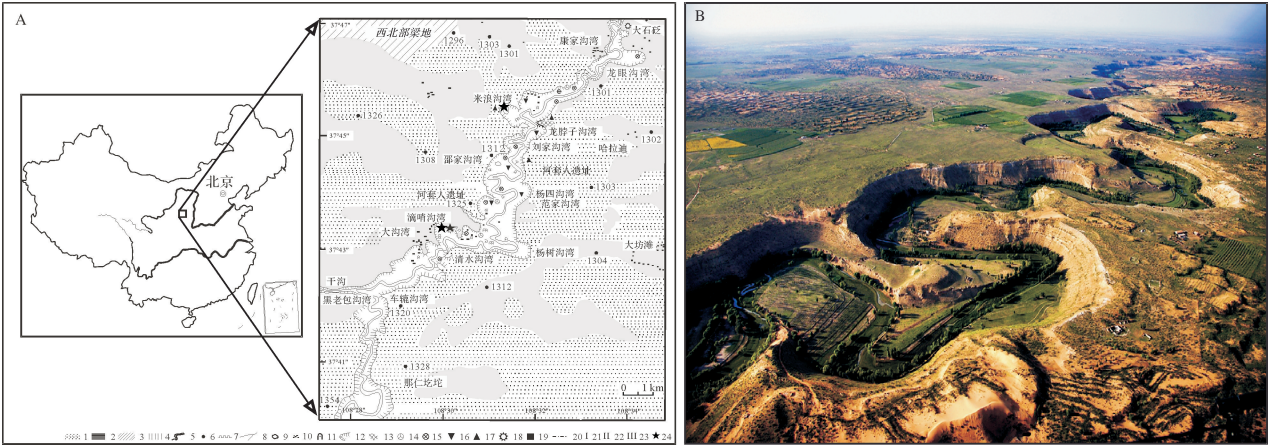


图 1 剖面地理位置(A)及航片(B)

1.沙漠;2.洼地;3.梁滩地;4.黄土;5.萨拉乌苏河;6.海拔高度;7.长城;8.河系;9.小湖泊;10.居名点;11.窑洞;12.陡崖;13.高原面;14.人类化石出露地点;15.脊椎动物化石出露点;16.旧石器出露地点;17.新石器出露地点;18.古城遗址;19.第三纪红土;20.地貌单元界限;21.梁滩地;22.东南部洼地;23.黄土丘陵;24.DGS1 位置

Fig.1 Location of the study area(A) and aerial photographs(B)

实,属弱成壤。泥炭以砂质沉积物为主,分选较好,黑色;次生黄土为深灰黄色粉沙,具水平层理,松散。

DGS1 总共有 7 个样品的年代测试结果,其中 6 个常规¹⁴C 年代(表 1)和 1 个 OSL 年代(见图 2)。对¹⁴C 年代采用 Calib7.0 程序中 Intcal 13 数据集^[17]进行校正(表 1)。在 7 个常规¹⁴C 年代中,位于 444 cm 深度的 9 450±52 a B.P.与 454 cm 深度的 9 384±83 a B.P.出现倒置。根据地层层序律和线性回归结果,9 384±83 a B.P.更符合“地层层序律”原则,故将 9 450±52 a B.P.剔除。同时滴哨沟湾剖面 DGS1 底部已有大量的绝对年代值^[18],以这些年代结果为控制点,运用沉积速率线性内插方法建立时间标尺,各层位的年代见表 2。由表 1 和图 2 可以看出,DGS1 层段的

起始年代(21LS 底部)为 10 925±216 cal. a B.P.;终止年代(1CS 顶部)为 1 800±100 a B.P.(OSL),可确定该层段属于全新世堆积。

表 1 滴哨沟湾 DGS1 层段¹⁴C 年龄测定结果
Table 1 ¹⁴C dating ages and calendar ages of some horizons in the DGS1

地层	深度/cm	年代结果/a B.P.	测年材料	校正后/a B.P.
3S	244	2 300±90	有机质	2 330±23
9P	320	3 473±25	有机质	3 760±72
17LS	424	5 901±35	有机质	6 723±73
18LS	444	8 406±32	有机质	9 450±52
18LS	454	8 360±31	有机质	9 384±83
21LS	484	9 500±100	有机质	10 856±301
21LS	484	9 600±160	有机质	10 925±216

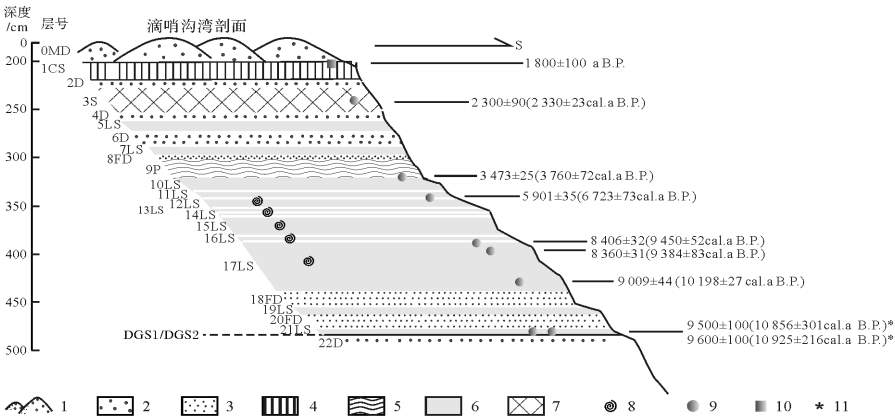


图 2 DGS1 沉积序列

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.湖沼相;7.古土壤;8.软体动物化石;
9.¹⁴C 测年;10.TL 测年;11.参考文献[18]

Fig.2 The sediment sequence of DGS1

表 2 DGS1 年代表
Table 2 The chronological table of DGS1

地层	年代/a B.P.	地层	年代/a B.P.	地层	年代/a B.P.	地层	年代/a B.P.
0MD	0~1 800	1CS	1 800~1 980	2D	1 980~2 090	3S	2 090~2 440
4D	2 440~2 630	5LS	2 630~2 820	6D	2 820~3 140	7LS	3 140~3 290
8FD	3 290~3 380	9P	3 380~3 760	10LS	3 760~5 510	11LS	5 510~6 590
12LS	6 590~7 030	13LS	7 030~7 200	14LS	7 200~7 340	15LS	7 340~8 170
16LS	8 170~8 600	17LS	8 600~10 130	18FD	10 130~10 460	19LS	10 460~10 570
20FD	10 570~10 610	21LS	10 610~11 000				

在 DGS1 层段,除现代沙丘砂外,其余层位均以 5 cm 间距采集样品,共获得 65 个样品进行微量化学元素分析。分析工作在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所中心实验室采用分析仪器为帕纳科公司生产的顺序式波长色散型 X 射线荧光光谱仪完成(型号:Axios,产地:荷兰,采用超尖锐陶瓷 X 射线光管,功率可达 4 KW,管流可达 160 mA)。采用粉末压片法制样,具体步骤为:称取 4 g 被研磨至过 200 目筛的样品,将其在 105℃ 下烘干后放入制样模具,用硼酸镶边垫底,在 30 吨的压力下压成镶边外径为 32 mm 的样片放入干燥器中待测。

2 结果

2.1 微量元素在 DGS1 层段的分布特征

在 DGS1 层段中,各类微量元素的含量变化较大,同

种元素在不同层位中也存在较大差别,为了便于描述和比较,将其变化范围和平均值列于表 3 中,在垂直方向上的变化规律绘制于图 3 中。可以看出,全剖面以 Sr、Ba、P 的含量最高,分布范围依次为 152.36~1 627.62 mg/kg、399.5~550.17 mg/kg、197.27~618.17 mg/kg,平均值依次为 536.67 mg/kg、486.99 mg/kg、361.11 mg/kg,其次为 Zr,分布范围和平均值为 70.99~216.52 mg/kg、131.47 mg/kg。其余 11 种元素的含量较少,平均值都低于 100 mg/kg,尤其是 Nb 的含量最低,分布范围和平均值为 1.88~12.75 mg/kg、7.21 mg/kg。

2.2 微量元素在沉积相的变化特征

在不同沉积相中,诸微量元素的含量与分布范围存在较大差异,将其分布范围与平均值分别列于表 3 并显示在图 3 中。不同沉积相的微量元素含量有显著变化,并呈现出不同的变化特征。如 P、V、Cu、Zn、

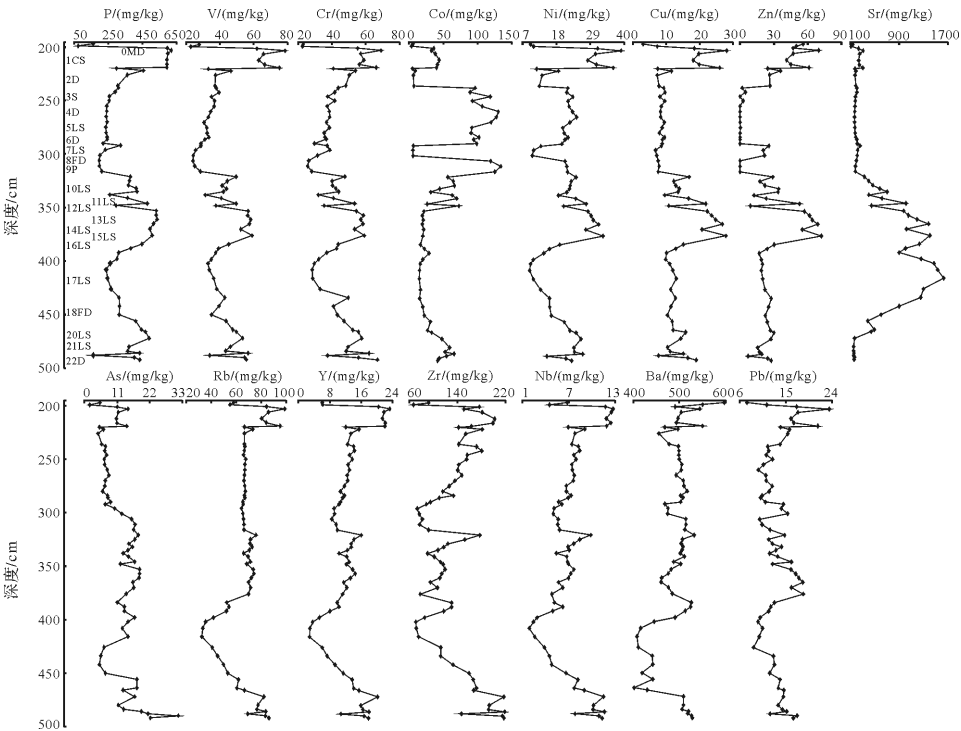


图 3 DGS1 各微量元素的垂向分布特征

Fig.3 The distribution of trace elements in the vertical aspect of DGS1

表 3 DGS1 不同沉积相中各微量元素的分布范围与平均值

Table 3 Distribution and average value of each different phase deposition of trace elements of DGS1 (mg/kg)							
	全剖面	P	S	D	FD	LS	CS
P 范围	197.27~618.17	197.27~211.78	255.15~361.76	234.93~592.07	232.44~592.07	220.56~535.92	593.22~618.17
平均值	361.11	202.05	296.57	309.73	331.81	365.96	599.87
V 范围	24.15~78.68	24.15~28.52	35.17~39.51	31.17~75.47	25.74~75.47	28.83~59.15	62.09~78.68
平均值	42.48	25.54	37.40	39.60	40.85	42.55	67.30
Cu 范围	6.83~28.1	7.21~7.91	7.33~9.66	7.48~26.04	6.83~26.04	8.35~27.86	18.11~28.1
平均值	13.21	7.60	8.64	10.79	11.41	14.66	20.84
Zn 范围	0.32~72.18	21.57~21.57	1.99~26.43	0.32~61.05	0.32~61.05	9.25~72.18	41.16~69.83
平均值	30.62	21.57	12.38	30.37	27.71	32.17	50.05
Sr 范围	152.36~1 627.62	178.76~208.20	172.01~205.83	169.70~302.56	169.70~900.70	152.36~1627.62	230.32~306.39
平均值	536.67	191.13	188.08	193.75	294.14	821.48	252.87
As 范围	4.59~18.57	12.60~17.05	4.59~7.50	5.09~14.22	5.08~17.74	5.55~18.57	10.78~14.75
平均值	11.84	15.54	6.43	7.67	9.05	13.52	11.79
Ni 范围	9.35~39.04	10.18~21.60	12.50~23.31	11.53~36.41	10.62~36.41	9.35~33.12	28.17~39.04
平均值	21.44	18.49	18.99	21.68	20.62	20.95	32.05
Pb 范围	8.71~23.44	9.90~15.34	11.21~15.36	9.65~21.18	9.65~21.18	8.71~18.34	16~23.44
平均值	13.45	11.88	12.66	12.85	13.26	13.20	18.074
Cr 范围	25.6~69.07	25.60~31.47	37.45~50.27	35.33~66.31	35.33~66.31	28.30~59.18	55.32~69.07
平均值	43.82	27.83	43.85	42.57	44.09	42.78	59.30
Co 范围	5.22~134.25	6.10~134.25	6.45~118.65	5.22~130.32	5.22~130.32	6.40~127.72	32.9~44.12
平均值	50.89	96.20	68.51	74.59	58.16	41.84	38.7
Rb 范围	32.55~99.12	65.41~66.23	65.86~67.88	66.72~95.38	49.81~95.38	32.55~77.61	80.48~99.12
平均值	66.40	65.94	66.76	70.82	68.25	62.54	86.85
Nb 范围	1.88~12.75	4.98~5.81	7.38~8.42	6.66~11.89	4.76~11.89	1.88~10.17	11.76~12.75
平均值	7.21	5.49	7.90	7.80	7.58	6.19	12.26
Ba 范围	399.5~550.17	474.18~514.04	455.51~499.39	467.98~550.17	399.50~550.17	408.12~532.08	490.95~544.07
平均值	486.99	503.46	487.87	506.80	486.12	485.25	505.98
Y 范围	2.83~23.2	8.52~9.95	12.51~14.29	10.68~22.02	9.12~22.02	2.83~16.41	20.36~23.2
平均值	12.61	9.32	13.50	13.40	13.20	10.96	21.754
Zr 范围	70.99~216.52	76.90~92.42	142.34~179.98	109.89~180.79	73.31~180.79	70.99~192.84	150.88~201.72
平均值	131.47	82.14	159.88	139.37	140.44	116.05	181.80

Sr、Ni、As、Pb 的含量变化主要呈现为泥碳<古土壤<沙丘砂<湖沼相<次生黄土,如 Cu 在沙丘砂的平均含量(10.79 mg/kg)低于整个层段(13.21 mg/kg)、湖沼相(14.66 mg/kg)和古固定—半固定沙丘砂(11.41 mg/kg),明显低于次生黄土(20.84 mg/kg),高于古土壤(8.64 mg/kg)和泥碳(7.60 mg/kg)。Co 呈现为泥碳>古土壤>沙丘砂>湖沼相>次生黄土,而 Cr、Rb、Nb、Ba、Y、Zr 均呈现为古土壤>沙丘砂>湖沼相,与次生黄土和泥碳的关系变化较为复杂。如 Zr 在古土壤中的平均含量(159.88 mg/kg)高于整个层段(131.47 mg/kg)、湖沼相(116.05 mg/kg)、泥碳(82.14 mg/kg)和沙丘砂(139.82 mg/kg),低于次生黄土(181.80 mg/kg)。这些元素含量在沉积相上的显著差异表明,DGS1 的沙丘砂、湖沼相、古土壤等的沉积背景不同。

2.3 微量元素的相关关系

一般来说,沉积物中地球化学元素的含量及其迁

聚程度受到物质来源、风化强度和植被吸附等因素的影响^[19]。众所周知, M_z (平均粒径)的变化正好揭示了物质来源和风化强度的变化规律,并被广泛应用。为了探讨微量元素的相互关系及其气候意义,将 M_z 与各种微量元素进行相关性分析(表 4),可以看出 M_z 与 P、V、Cu、Zn、Sr 呈显著的正相关(相关系数>0.5),与 Co 呈显著的负相关(相关系数为-0.6);与 Ba、Cr、As 和 Pb 呈较好的相关性(相关系数绝对值>0.3);而与 Rb、Nb、Ni、Y、Zr 只有弱相关性乃至无相关性(相关系数的绝对值小于 0.3)。这表明沉积物微量元素受颗粒粒径变化的影响不尽相同,Nb、Ni、Y 和 Zr 几乎不受颗粒大小变化的影响,很可能是对不同气候环境的反映。

同时,从表 3 中发现,P、V、Cr、Ni、Cu、Zn、Pb 的之间相关系数均大于 0.7,呈显著的相关性,说明它们具有相似的地球化学行为或某些共同的控制因素。

表4 Mz与各微量元素之间的相关系数表

Table 4 The correlation coefficient between Mz and trace elements

	P	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Pb
Mz	0.53**	0.57**	0.39**	-0.60**	0.17	0.64**	0.65**	0.40**	-0.22	0.77**	-0.06	-0.08	-0.13	-0.43**	0.32*
P	1	0.95**	0.91**	-0.47**	0.72**	0.86**	0.87**	0.40**	0.59**	0.16	0.71**	0.45**	0.62**	0.09	0.84**
V		1	0.91**	-0.36**	0.79**	0.89**	0.83**	0.35**	0.60**	0.15	0.73**	0.48**	0.65**	0.14	0.82**
Cr			1	-0.41**	0.72**	0.78**	0.81**	0.2	0.65**	0.02	0.76**	0.56**	0.68**	0.08	0.87**
Co				1	0.2	-0.38**	-0.68**	-0.16	0.18	-0.54**	0.07	0.07	0.13	0.49**	-0.45**
Ni					1	0.76**	0.54**	0.35**	0.80**	-0.15	0.77**	0.40**	0.70**	0.43**	0.67**
Cu						1	0.91**	0.52**	0.45**	0.42**	0.46**	0.09	0.34**	0.07	0.79**
Zn							1	0.45**	0.37**	0.44**	0.40**	0.06	0.27*	-0.1	0.86**
As								1	0.15	0.36**	0.07	-0.19	0.01	0.07	0.29*
Rb									1	-0.59**	0.91**	0.52**	0.87**	0.61**	0.70**
Sr										1	-0.54**	-0.50**	-0.61**	-0.48**	-0.01
Y											1	0.78**	0.98**	0.45**	0.68**
Zr												1	0.84**	0.18	0.28*
Nb													1	0.45**	0.58**
Ba														1	0.18
Pb															1

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关;*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

一般来说,V、Cr、Ni^[20]、P、Cu、Zn和Pb^[21-22]等是化学性质较活跃的湿润气候型元素,即当气候暖湿时,风化淋溶作用强烈,易于随溶液迁移,从原地淋出并聚集在地势低洼处,而在干冷情况下,风化和淋溶作用作用减弱,淋失减少,容易富集在原地。Co与上述元素呈较强的负相关性,而与Rb、Nb、Ba、Y、Zr呈微弱的正相关性甚至不相关,这或许与它们的化学性质比较稳定有关^[20,23],迁移程度较弱,在风化淋溶作用较强的环境下,容易在原地富集而成为峰值。Sr与Co、Rb、Y、Zr、Nb、Ba之间为较显著的负相关关系,与Cu、Zn和As呈较好的正相关,这可能跟Sr元素主要富集在钾长石、斜长石等硅酸盐矿物和碳酸盐矿物中,容易在风化成壤过程中伴随土壤溶液或地表水进行迁移而大量淋溶^[24]有关。

3 讨论

3.1 DGS1的堆积—风化过程

毛乌素沙漠现代冬、春季节,以偏北风为主的冬季风盛行,寒冷干燥,风沙活动加剧、化学风化微弱;夏秋季节,以东南季风为主的夏季风加强,雨量增大,流水作用活跃,部分沙丘得以固定,以风化成壤作用和河湖沉积为主要营力,化学风化作用增强。所以,在冬夏季风交替的毛乌素沙漠的沉积序列或许是古亚洲季风的真实气候的地层记录^[25]。图3显示,大部分元素在在流动沙丘砂和古流动沙丘砂的含量分布范围上比较相近,表明这些古流动沙丘沉积时的环

境有如现代流动沙丘。同时,古风成砂扫描电镜分析结果也显示了磨圆度高,表面存在蝶形坑、上翻解理薄片等风成特征^[26](图4)。表明这些古流动沙丘沉积环境近似现代流动沙丘。作为全新世某一个时期的风沙活动来说,只是现代这种风沙情景在过去的重复,代表了过去多期冬季风盛行。基于此,我们倾向于将0MD、2D、4D、6D、8FD、18FD、20FD归结为以冬季风主导的、气候恶化的阶段。可以想象,在西伯利亚—蒙古高压推动下的冬季风盛行时期,来自北方的干寒西北气流吹扬大量粗粒碎屑形成风沙流,形成流动沙丘。此时的气候寒冷干燥,不稳定矿物如云母、角闪石、绿帘石等矿物的成壤作用十分微弱,基本上只产生了风力搬运过程中颗粒之间的摩擦、碰撞导致的粗细变化等物理风化,微量元素的迁移聚集程度微弱。反之,西伯利亚—蒙古高压势力减弱,夏季风增强,降水增加,气候炎热,利于植被恢复,使风沙活动减弱甚至终止,颗粒细化。同时也产生了较强的流水搬运或风化成壤的物理—化学风化过程,矿物逐渐破碎、分解,释放大量微量元素,叠加植被生长吸收和枯枝落叶释放的影响,提高了微量元素的迁移聚集程度。在湖沼相(5LS、7LS、10-17LS、19LS、21-22LS)、古土壤(3S)和泥炭(9P)发育期,微量元素呈现为增加或减少的两种变化趋势。上述微量元素在沉积相中的分布规律表明,P、V、Cu、Zn、Sr、Ni、As、Cr、Pb在表生地球化学条件下属于易迁移—较稳定的元素,在古土壤发育期,强烈的风化淋溶和成壤作用,导致其

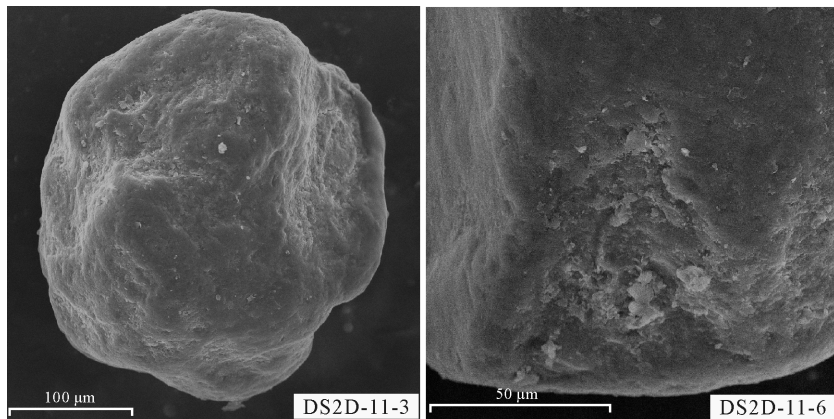


图4 DGS1 部分沙丘砂在扫描电镜分析下的表面结构特征

Fig.4 Surface texture feature of quartz grain by SEM of DGS1

含量低于风成砂中的含量。在湖沼相发育期,由于其汇聚了周边的水流,将周边环境的此类元素汇集于湖泊中,导致含量较高。这一现象从次生黄土的含量变化也能体现出来,次生黄土属于流水搬运后的沉积物,汇集了周边环境的多种元素,其含量在全剖面几乎都呈现为峰值。Co、Rb、Nb、Ba、Y、Zr 在表生地球化学条件下是相对稳定的元素或惰性元素。在古土壤发育期,强烈的风化淋溶和成壤作用使 P 等易溶元素淋湿,Co 等相对稳定元素则相对聚集,形成峰值。在湖沼相发育期,周边流水及其溶解的元素汇聚于此,导致 P 等活性元素含量较高,而 Co 等惰性元素受其“稀释作用”影响,含量相对较低。在沙丘砂发育过程中,如果某些时期的水热条件较好,古流动沙丘得以固定,形成固定—半固定沙丘砂,成壤作用加强,矿物质风化,产生了一定的迁移聚集作用,故其元素含量的变化也主要呈现为 P、Cr、V、Cu、Zn、Sr、Ni、As、Pb 的含量低于沙丘砂,而 Co、Rb、Nb、Ba、Y、Zr 的含量则高于沙丘砂。

综上,DGS1 微量元素以 P、V、Cu、Zn、Sr、Ni、As、Cr、Pb 为高值出现的风砂沉积应该是干冷的东亚冬季风在过去多次盛行的结果,属于以冬季风为主导的气候恶化阶段。以最低值出现的古土壤和以最高值出现的湖沼相,是在夏季风主导作用下的大气温湿度增加而导致化学风化能力加强的结果。古固定—半固定沙丘砂亦是相对于沙丘砂稍湿热的气候环境,但弱于古土壤和湖沼相。因此,沙丘砂或古固定—半固定沙丘砂与湖沼相或古土壤组成的峰谷交替可视为风成砂活动期的干冷气候与风沙活动停滞及风化成壤作用增强期的暖湿气候组成的沉积—气候旋回,进

而指示了该区全新世以来的冷暖气候波动规律。

3.2 DGS1 的气候波动过程

上述分析显著体现了微量元素的变化特征与气候环境之间的密切关系。为了探讨 DGS1 在全新世的气候变化过程,根据微量元素之间的相关性分析结果,选择呈显著负相关性的 Rb、Sr 作为气候代用指标。据研究,二者属于典型的离散型元素,风化过程中,Rb 的活性比 Sr 弱,Rb 因离子半径较大,容易被黏土矿物吸附而保留在原地,Sr 因离子半径较少,较容易以游离 Sr 的形式随土壤水淋失^[24,27-28]。因此,二者在剖面中显示为显著的负相关关系。剖面中的 Rb 和 Sr 呈显著的负相关性,相关系数为-0.61。因此,将二者的变化曲线绘制于图 5 中,显示多个出峰谷交替的特征,据此大致可以将这些波动及其揭示的气候变化分为四个阶段进行讨论:

第一阶段(图 5 中 A 区)起止年代为 11 000~10 130 a B.P.。该阶段 Rb 的含量降低,Sr 含量升高,显示气候变得湿热,冬季风逐渐减弱,夏季风增强,为转暖期。沉积相由末次冰期的流动沙丘(22D)转变为湖沼相或固定—半固定沙丘(21LS、20FD、19LS 和 18FD),说明在暖湿程度增强的条件下,沙丘逐渐固定,甚至在局部地区形成了暂时性湖泊和沼泽,湖沼相发育。期间 18FD(10 130~10 460 a B.P.)和 20FD(10 570~10 610 a B.P.)代表了转暖过程中的两次冷事件,可与 Bond 等^[29]发现的北大西洋冷事件中的 10.3 ka 对比。该阶段的开始时间也基本同步于祁连山敦德冰芯记录的 10.75 ka。

第二阶段(图 5 中 B 区)起止年代为 10 130~6 590 a B.P.。该阶段 Rb 呈现为低谷而 Sr 呈现为峰

值,说明该时期气候十分湿热,夏季风强盛,降水丰富,在地层上以灰白色的湖沼相堆积为主要特色,内含大量软体动物化石,是全新世的大暖期。丰富的降水使该处形成了暂时性湖泊,汇聚了周围环境中以Sr为代表的易溶性元素,形成峰值,而以Rb为代表的惰性元素由于迁徙能力较弱,湖中聚集数量较少而呈现为谷值。因此,判断该阶段为全新世大暖期。与侯光良等^[30]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.基本相符。

第三阶段(图5中C区)起止年代为6 590~3 760 a B.P.。该阶段微量元素Rb含量逐渐升高而Sr含量迅速降低,说明气候逐渐转冷,为全新世的转冷期。该阶段的夏季风逐渐减弱,冬季风开始增强,风沙活动增强,更多的沙物质进入湖泊中,导致微量元素含量的变化。与陈云等^[31]发现的该阶段表现为快速降温变干过程相符。

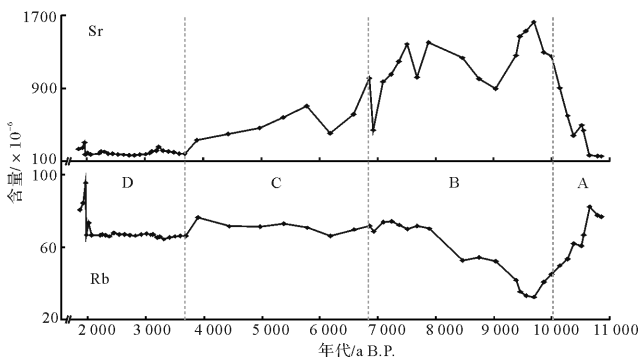


图5 DGS1中微量元素Rb、Sr的含量揭示的全新世气候变化

Fig.5 Holocene climate change process revealed by the content change of Rb, Sr of DGS1

第四阶段(图5中D区)起止年代3 760~0 a B.P.。该阶段微量元素Sr和Rb均呈现为低谷,但存在变化幅度相对较小的频繁波动,为寒冷的气候波动频繁时期。该阶段的沉积相由前期的湖沼相演变为多种沉积相,如沙丘砂(0MD、2D、4D、6D、8FD)、湖沼相(5LS、7LS)、古土壤(3S)和泥炭(9P),说明气候不稳定且波动频繁,期间2D、4D、6D是气候急剧变冷的结果。这与侯光良等^[29]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对比,6D(2 820~3 140 a B.P.)可与北大西洋冷事件2.8 ka对比,9P(3 380~3 760 a B.P.)可与北大西洋冷事件4.2 ka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^[32]和侯光良等^[30]的

气温集成序列显示的小冰期之前1 ka B.P.前后有一次短暂的温暖期相一致。

致谢 样品采集由赵欣楠、司月君协助完成;化学元素分析由中科院寒旱所孙忠完成;OSL年代由中国地质科学院赵华测定;¹⁴C年代由中科院寒旱所胡智育测定,再此一并感谢。

参考文献 (References)

- Bond G C, 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]//Clark P U, Webb R S, Keegwin L D, eds. Mechanisms of Global Climate Change at Millennial Time Scales. Washington DC: American Geophysical Union, 1999: 35-58.
- 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]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23(20/22): 2113-2126.
- Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene [J], Science, 2001, 294(5549): 2130-2136.
- Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from Southern Oman [J]. Science, 2003, 300(5626): 1737-1739.
- 姚檀栋,施雅风. 祁连山敦德冰芯记录的全新世气候变化 [M]//施雅风,孔昭宸. 中国全新世大暖期气候与环境. 北京:海洋出版社, 1992:206-211. [Yao Tandong, Shi Yafeng. Qilian Mountains Dunde ice core record of Holocene climate change [M]// Shi Yafeng, Kong Zhaochen. China Holocene Climate and Environment. Beijing: Ocean Press, 1992: 206-211.]
- 陈发虎,朱艳,李吉均,等. 民勤盆地湖泊沉积记录的全新世千百年尺度夏季风快速变化 [J]. 科学通报, 2001, 46(17): 1414-1419. [Chen Fahu, Zhu Yan, Li Jijun, et al. The Holocene ka-scale climate Summer Wind rapid variation indicated by lake sediments record in the Minqin Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(17): 1414-1419.]
- 邵晓华,汪永进,程海,等. 全新世季风气候演化与干旱事件的湖北神农架石笋记录 [J]. 科学通报, 2006, 51(1): 80-86. [Shao Xiaohua, Wang Yongjin, Cheng Hai, et al. Shennongjia stalagmite record of Holocene climate evolution and monsoon drought events [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(1): 80-86.]
- 杨利荣,岳乐平. 浑善达克沙地末次冰期晚期到全新世的环境转变 [J]. 地球环境学报, 2011, 2(1): 301-306. [Yang Lirong, Yue Leping. The environmental transformation from late glacial to Holocene of Otindag sandyland [J]. Journal of Earth Environment, 2011, 2(1): 301-306.]
- 吴利杰,石建省,毕志伟,等. 泾河中游将军村全新世剖面中钾素的地球化学特征及古气候意义 [J]. 地球环境学报, 2013(2): 1266-1271. [Wu Lijie, Shi Jiansheng, Bi Zhiwei, et al. Geochemical characteristics of potassium in Jiangjuncun section of the middle reaches of

- Jinghe River during the Holocene and its paleoclimatic significance[J]. *Journal of Earth Environment*, 2013(2): 1266-1271.]
- 10 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(2): 101-107. [Min Longrui, Chi Zhenqin. Discussion on plans of dividing Quaternary to series in China [J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(2): 101-107.]
- 11 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 Milanggouwan Section Salawusu River area[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 162(1/2): 1-16.
- 12 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: 63-70.
- 13 Si Y J, Li B S, Zhang D D, et al. Climate fluctuation on a kiloyear scale during the Late Last Glacial in Mu Us Desert, China; evidence from Rb and Sr contents and ratios [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(11): 4521-4530, doi: 10.1007/s12665-014-3352-0.
- 14 Niu D F, Li B S, Du S H, 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 Science*, 2008 (1): 26-36.
- 15 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 the Salawusu River Valley[J]. *Chinese Geographical Science*, 2010, 20(3): 243-251.
- 16 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[J]. *Journal of Desert Research*, 1983, 3(2): 9-14.]
- 17 Reimer P J, Edouard B, Bayliss A, et al. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50000 Years cal BP [J]. *Radiocarbon*, 2013, 55(4): 1869-1887.
- 18 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): 90-96. [Su Zhizhu, Dong Guangrong, Jin Heling. A Geochronological study of the Salawusu strata in North China[J]. *Journal of Geomechanics*, 1997, 3(4): 90-96.]
- 19 董光荣,高尚玉,金炯,等. 青海共和盆地土地沙漠化与防治途径 [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1-226. [Dong Guangrong, Gao Shangyu, Jin Jiong, et al. Land desertification and its control in Gonghe Basin, Qinghai province [M]. Beijing: Science Press, 1993: 1-226.]
- 20 黄汝昌. 陆相沉积中古气候演变及元素的迁移、聚集和演化 [C]// 中国科学院兰州地质研究所集刊(第一号). 北京: 科学出版社, 1982: 137-160. [Huang Ruchang. Continental sedimentary paleo-climate evolution and the migration, accumulation And evolution of elements [C]// The Journal Archives of Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Science (The First Edition). Beijing: Science Press, 1982: 137-160.]
- 21 庞奖励,黄春长,张占平. 陕西五里铺黄土微量元素组成与全新世气候不稳定性研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(2): 151-156. [Pang Jiangli, Huang Chunchang, Zhang Zhanping. Pb, Cu, Zn, Cd, Mn elements and climatic change in the loess-paleosol profile at Qishan, Shanxi province[J]. *Journal of Chinese Desert*, 2006, 21(2): 151-156.]
- 22 李明启,靳鹤龄,董光荣,等. 萨拉乌苏河流域微量元素揭示的气候变化[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 172-179. [Li Mingqi, Jin Heling, Dong Guangrong, et al. Climate change indicated by trace elements in Salawusu River Basin [J]. *Journal of Chinese Desert*, 2006, 26(2): 172-179.]
- 23 多布罗沃利斯基. 微量元素地理学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 31-32. [Добровольский В. В. Trace Element Geography [M] Beijing: Science Press, 1987: 31-32.]
- 24 陈骏,安芷生,汪永进,等. 最近 800ka 洛川黄土剖面中 Rb/Sr 分布和古季风变迁[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 1998, 28(6): 498-504. [Chen Jun, An Zhisheng, Wang Yongjin, et al. Distribution of Rb and Sr in the Luochuan loess-paleosol sequence of China during the last 800 ka[J]. *Science China(Seri.D): Earth Sciences*, 1998, 28(6): 498-504.]
- 25 李保生,靳鹤龄,吕海燕. 150 ka 以来毛乌素沙漠的堆积与变迁过程[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 1998, 28(1): 85-90. [Li Baosheng, Jin Heling, Lv Haiyan. Mu Us Desert in the process of accumulation and changes since 150 ka[J]. *Science China(Seri.D): Earth Sciences*, 1998, 28(1): 85-90.]
- 26 陈丽华,缪昕,于众. 扫描电镜在地质上的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1986. [Chen Lihua, Miu Xin, Yu Zhong. Scanning Electron Microscopy Applications in Geology [M]. Beijing: Science Press, 1986.]
- 27 刘冰,靳鹤龄,孙忠,等. 青藏高原东北部风成沉积微量元素揭示的全新世千年尺度气候变化[J]. 古地理学报, 2013, 15(6): 423-433. [Liu Bing, Jin Heling, Sun Zhong, et al. Millennial scale climate change in the Holocene revealed by trace elements of aeolian deposits in northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(6): 423-433.]
- 28 刘宇飞,李保生,杨艺,等. 末次间冰期我国半干旱盆地 Rb, Sr 的迁移聚集规律与环境演变——以萨拉乌苏河流域米浪沟湾剖面研究结果为例[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 241-344. [Liu Yufei, Li Baosheng, Yang Yi, et al. Moving and accumulating law of Rb, Sr with environment evolving in Semiarid Basin of China during the last interglacial—Reflected by study result on Milanggouwan stratigraphic section in the Salawusu River Valley [J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(3): 241-344.]
- 29 章新平,姚檀栋. 祁连山敦德冰帽冰芯中气候记录的综述[J]. 新疆气象, 1993, 16(6): 1-6. [Zhang Xinping, Yao Tandong. Summary of the Qilian Dunde caps ice core climate records [J]. *Xinjiang Meteorological*, 1993, 16(6): 1-6.]
- 30 侯光良,方修琦. 中国全新世气温变化特征[J]. 地理科学进展, 2011, 30(9): 1075-1080. [Hou Guangliang, Fang Xiuqi. Characteristics of Holocene temperature change in China [J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(9): 1075-1080.]

- 31 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 instability records of megathermal period in Holocene[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,

1999, 19(3): 97-103.]

- 32 Grootes P M, Stuiver M, White J W C, et al. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores[J]. Nature, 1993, 366(6455): 552-554.

Holocene Climate Fluctuations from the Record of Trace Elements in the Mu Us Desert: Evidence from the DGS1 segment of the Salawusu River Valley

NIU DongFeng¹ LI BaoSheng^{1,2} WANG FengNian³ CHEN Qiong¹
SHU PeiXian¹ WEN XiaoHao¹ CHEN Min¹

(1. Geography Department of South China Normal University, Guangzhou 510631;

2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061;

3. Huizhou University, Huizhou, Guangdong 516007)

Abstract: The DGS1 segment of the Dishaogouwan section in the Salawusu River Valley on the southeast edge of the Mu Us Desert is selected to study the climate fluctuations on millennium-scale during the Holocene. Based on the trace elements analysis and age determination, we find that the contents of P, V, Cu, Zn, Sr, Ni, As, Cr, Pb are least in the paleosols, less in the dune sands than that in the lacustrine facies, because they are easy to migrate and slightly stable; the contents of Co, Rb, Nb, Ba, Cl, Zr, are most in the paleosols, more in the dune sands than that in the lacustrine facies, because they are stable inert elements. The results suggest that the dune sands are mainly the aeolian sediments in the dominance of the winter monsoon, and the paleosols and lacustrine facies are the sediments in the dominance of the summer monsoon. According to the changes in the alternations of peaks and valleys of these trace elements, the DGS1 is divided into four periods: warming period (11 000 ~ 10 130 a B.P.), Megathermal period (10 130 ~ 6 590 a B.P.), cooling period (6 590 ~ 3 760 a B.P.) and cold period (3 760 ~ 0 a B.P.), which are consistent with the related research results abroad and domestic. It reveals that the climate variations in the Salawusu River Valley are subject to the global environmental changes.

Key words: Mu Us Desert; DGS1 in Dishaogouwan section; trace elements; Holocene climate changes