

周维鑫,温小浩,李保生,等.萨拉乌苏河流域干沟子剖面全新世湖相沉积的地球化学元素特征及其反映的物源变化[J].中国沙漠,2022,42(1):114-122.

萨拉乌苏河流域干沟子剖面全新世湖相沉积的地球化学元素特征及其反映的物源变化

周维鑫^{1,2}, 温小浩¹, 李保生^{1,3}, 王晨¹, 田梦圆¹, 邱明昆¹

(1.华南师范大学地理科学学院, 广东 广州 510631; 2.株洲市第八中学, 湖南 株洲 412008; 3.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)

摘要: 为探究萨拉乌苏河流域中上游段湖相沉积物的来源及沉积环境,通过测量干沟子剖面3个样品的年代和113个样品的地球化学元素的含量,分析了干沟子剖面地球化学特征反映的沉积物的来源,探讨了其代表的全新世以来的沉积环境变化。结果表明:在剖面垂直方向上,CaO、MgO、Sr、Cl、Br以110 cm为界,含量发生剧烈变化,250—110 cm为明显低值段,而110—0 cm为显著高值段,其余元素多与它们呈现相反的变化趋势或表现为一定范围内的波动。物源的改变是导致CaO、MgO、Sr、Cl、Br等元素在深度110—0 cm显著增加的主要原因:12—6.7 Cal.ka B.P. (250—110 cm)剖面所在古湖为相对封闭环境,其物源主要受周围沙丘来源影响;6.7—2.2 Cal.ka B.P. (110—0 cm),湖泊转为半封闭环境,南部有来源于黄土高原北部白于山的河流(今萨拉乌苏河上游)汇入,此时段其物质来源受到河流携带进来的黄土物质的深刻影响。

关键词: 萨拉乌苏河流域; 全新世; 干沟子剖面; 地球化学元素; 物源

文章编号: 1000-694X(2022)01-114-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00125

中图分类号: P532

文献标志码: A

0 引言

全新世是与人类关系最为直接且紧密的地质时代,其时的气候变化在冰芯^[1]、湖泊沉积^[2]、黄土^[3]、孢粉^[4]、石笋^[5]、深海沉积^[6]、泥炭^[7]等不同沉积载体中都有很好的记录。地处中国东部季风边缘的鄂尔多斯高原毛乌素沙地东南缘萨拉乌苏河流域,位于沙漠-黄土的过渡带,蕴藏着丰富的气候环境演变信息^[8-12]。其中的全新世气候变化的探讨主要集中在米浪沟湾剖面 and 滴哨沟湾剖面。张宇红等^[8]、罗开利等^[9]、李后信等^[10]等分别通过对米浪沟湾剖面风成砂与河湖相和古土壤粒度特征、CaCO₃含量、主元素含量的分析,将全新世划分为7个与沉积旋回对应的气候旋回。舒培仙等^[11]、王丰年等^[12]通过分析滴哨沟湾剖面DGS1段的粒度和CaCO₃数据,将全新世气候分为4个阶段——全新世早期好

转期(11 020—10 290 a B.P.)、全新世鼎盛期(10 290—6 590 a B.P.)、暖冷过渡期(6 590—3 760 a B.P.)和冷干气候不稳定期(3 760—0 a B.P.)。从涉及萨拉乌苏河流域全新世文献来看,尽管不少学者通过不同沉积序列揭示了该地全新世气候环境变迁,但对于其气候变化的看法还不甚一致,且对该流域其他地点剖面尤其是流域中上游段研究展开尚少。因此,本文结合AMS-¹⁴C年代测定结果,分析该流域中上游干沟子剖面的地球化学特征及其可能的沉积物来源与沉积环境变化,将有助于补充和丰富该流域全新世气候变化的信息。

1 材料与方法

1.1 自然地理环境与干沟子剖面概况

萨拉乌苏河(37°10'—37°59'N, 108°10'—108°

收稿日期:2021-06-16; 改回日期:2021-10-09

资助项目:国家自然科学基金项目(41771003, 41301004, 42171005)

作者简介:周维鑫(1996—),女,湖南益阳人,硕士研究生,研究方向为地表过程与演变。Email: 1257204498@qq.com

通信作者:温小浩(Email: wenxiaohao@scnu.edu.cn)

58'E)位于鄂尔多斯高原毛乌素沙地东南缘(图 1),横跨黄土高原与鄂尔多斯高原东南部洼地,海拔 1 800—1 100 m。年平均气温 6.0—8.5℃,最冷月(1月)平均气温-9.5—-12℃,最热月(7月)平均气温 22—24℃。萨拉乌苏河流域属于半干旱区,

多年平均降水量由东南部 440 mm 向西逐渐递减至 250 mm,受东亚夏季风影响,降水集中在夏季(7—9月)且常以暴雨形式出现,夏季降水量占全年降水量的 60%—70%^[13]。全年蒸发量较大,为 1 800—2 500 mm^[14]。

干沟子地层剖面(37°42'N、108°28'E,海拔约 1 310 m)位于萨拉乌苏河左岸一干涸的切沟边(图 2)。该剖面顶部为耕作层,厚 80 cm,因受人工干扰,故本文不作讨论。这里所涉及的干沟子剖面是一套厚 250 cm 的湖泊沉积,自上而下大致可分为 2 个亚层:①0—66 cm,灰白色砂质粉砂,可见大量钙质结核,较为紧实;②66—250 cm,灰白色-青灰色粉砂质砂,有铁锈斑点,底部可见明显的冻融褶皱;该段下伏为灰黄色的风成砂。

1.2 方法

对本论文所选取的干沟子剖面的 3 个层位样品的总有机碳进行加速器 AMS-¹⁴C 年代测定,均在美国 BETA 实验室完成。所获得的年代数据采用 Calib8.1 程序中的 IntCal 20 数据集进行校正,误差设置为±2σ。

自上而下以 2 cm 间距采样,共采集样品 125 个,但因运输样品期间遗失深度 128—150 cm 处样品,本文最终讨论其他 113 个样品的地球化学元素测试结果,空缺深度 128—150 cm 数据用虚线示意。地球化学元素测试所用仪器为荷兰帕纳科(PANa-

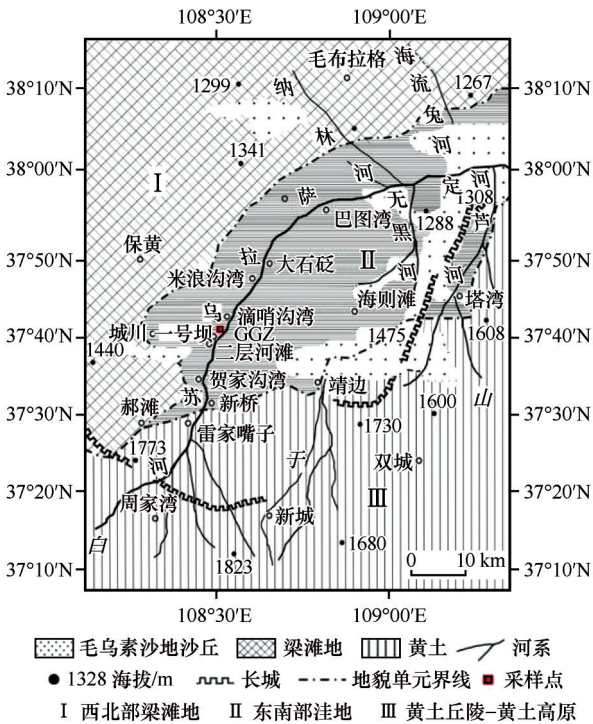


图 1 萨拉乌苏河流域与干沟子剖面位置(据文献[15]修改)
Fig.1 Position of Salawusu River Valley and Gangouzi section (revised by ref.[15])

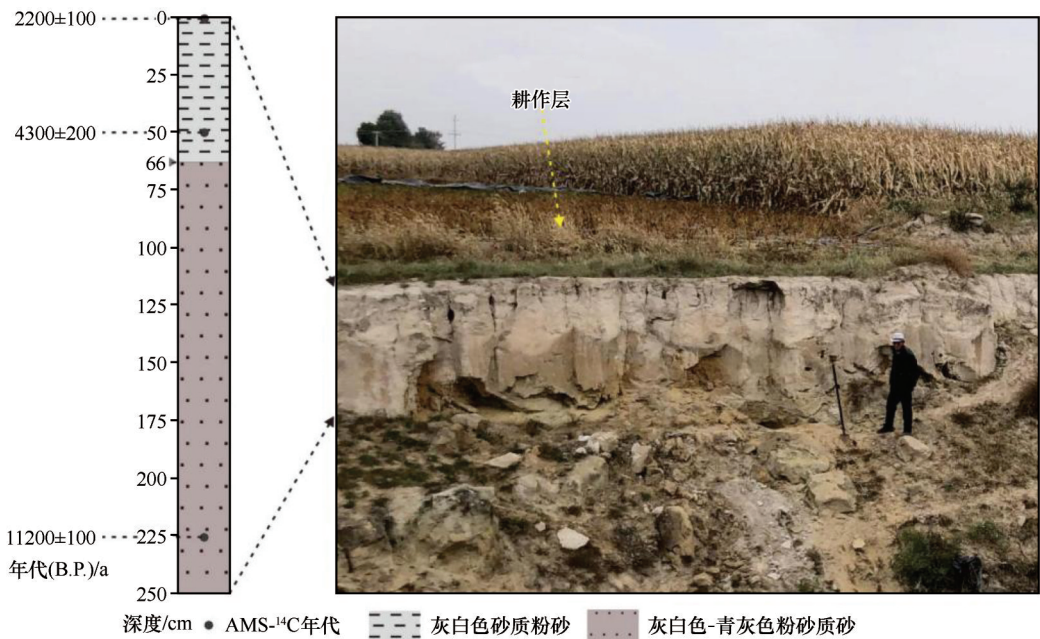


图 2 干沟子剖面照片和岩性柱状图及年代序列

Fig.2 Photo and lithologic histogram of Gangouzi section and radiocarbon ages

lytical)偏振能量色散X-荧光光谱仪(型号Epslion 5)。首先将低温烘干(<40℃)的样品过16目筛去除杂物后风干,然后用国产的ZHM-1A型振动磨样机研磨90 s,过200目(<74 μm)筛,接着取6.0 g分磨样品以硼酸镶边垫底,在30T压力下保压时间30 s,最后压制为直径约3.2 cm的圆饼状待测样片。然后将其置于仪器中测定。测试的常量元素Si、Ca、Al、Mg、Fe、K、Na、Ti等8种,结果以氧化物形式表示(%);微量元素为Sr、P、Zr、Cl、Rb、V、Zn、Co、Cu、Pb、Nb、Br等共12种,单位以百万分之一(ppm)表示。实验中校正曲线使用27个国家土壤成份分析标准物质(GSS2—GSS28)、6个水系沉积物标准物质(GSD2a、GSD7a、GSD9—GSD12)和6个岩石

标准物质(GSR1—GSR6)。实验过程中加入水系沉积物标准物质GSS17标准样品进行控制。实验误差±5%—10%。

2 结果分析

2.1 测年结果

干沟子剖面深度0、50、226 cm处的年龄分别为2 260±30、3 880±30、9 740±30 a B.P.,其校正日历年分别为2 200±200、4 300±100、11 200±100 Cal. a B.P。可见,本文研究涉及的干沟子剖面湖泊沉积时代为11 200—2 200 Cal. a B.P.,即该地在早全新世到全新世以湖泊为主(表1)。

表 1 干沟子剖面 AMS-¹⁴C 年代测试结果
Table 1 AMS-¹⁴C dating test results of Gangouzi section

样品编号	深度/cm	实验室编号	测定材料	δ ¹³ C/‰	¹⁴ C年代(B.P.)/a	校正年龄(B.P.)/a
GGZ-AMS1	0	Beta-485458	有机质	-23.30	2260±30	2 200±100
GGZ-AMS2	50	Beta-504593	有机质	-22.60	3880±30	4 300±200
GGZ-AMS3	226	Beta-485461	有机质	-24.80	9740±30	11 200±100

2.2 常量元素氧化物的分布特征

干沟子剖面常量元素氧化物SiO₂、CaO、Al₂O₃、MgO、TFe(全铁)、K₂O、Na₂O、TiO₂分析结果列于表2并绘制于图3。

各常量化学元素氧化物含量不等甚至差别较大, SiO₂、CaO含量变动范围大。SiO₂的含量最高,

平均值60.84%,范围30.54%—53.52%;CaO含量次之,平均9.8%,范围0.72%—29.93%;Al₂O₃、MgO、TFe、K₂O、Na₂O、TiO₂的含量依次减少。整个剖面SiO₂标准偏差最大(19.21),TiO₂(0.04)标准偏差较小。CaO、MgO的变异系数明显高于其他元素,分别为1.03、0.87,这表明这两者含量的变化对其他元素含量的影响较大。

表 2 干沟子剖面常量元素氧化物含量分布(%)
Table 2 Content distribution of major element oxides in Gangouzi section (%)

沉积层段	数值类型	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	TFe	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
0—110 cm	最大值	93.52	29.93	10.06	6.23	1.50	2.63	2.10	0.29
	最小值	30.54	0.87	4.50	0.46	3.90	0.83	0.91	0.12
	平均值	44.06	18.67	7.04	3.62	2.26	1.58	1.43	0.19
110—250 cm	最大值	89.57	1.05	11.02	1.23	3.90	2.63	2.56	0.29
	最小值	68.58	0.72	6.84	0.14	0.70	1.43	2.02	0.16
	平均值	77.90	0.83	9.47	0.67	1.99	1.64	2.27	0.22
全剖面	最大值	93.52	29.93	11.02	6.23	3.90	2.63	2.56	0.30
	最小值	30.54	0.72	4.50	0.14	0.70	0.83	0.91	0.13
	平均值	60.84	9.82	8.24	2.15	2.12	1.61	1.84	0.20
	标准偏差	19.21	10.12	1.66	1.86	0.68	0.39	0.48	0.04
	变异系数	0.32	1.03	0.20	0.87	0.32	0.24	0.26	0.20

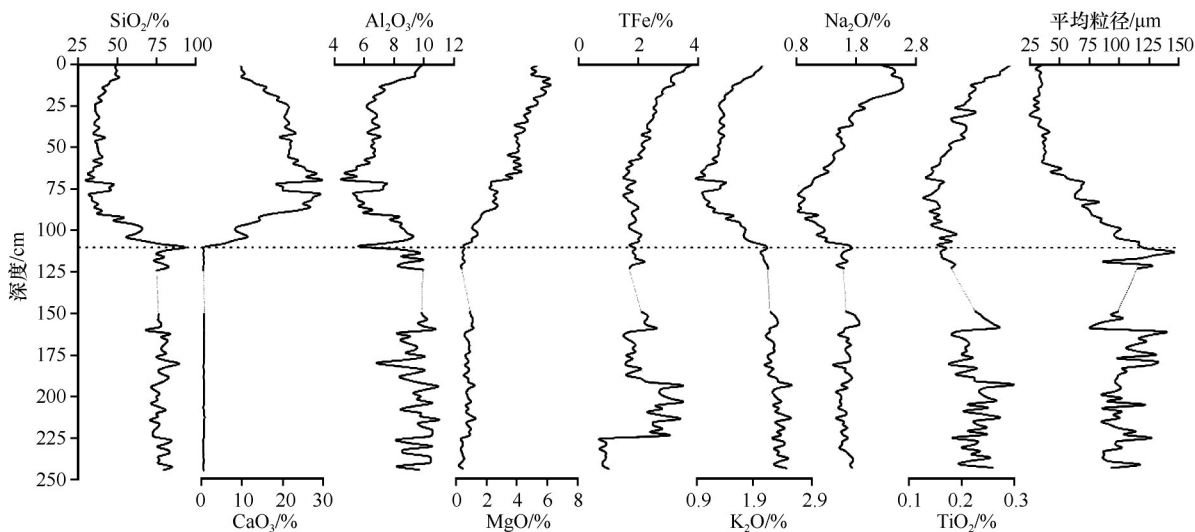


图 3 干沟子剖面常量元素氧化物含量随深度的变化
Fig.3 Changes of major element oxides content with depth in Gangouzi section

从剖面垂直方向上来看,大部分常量元素氧化物以深度 110 cm 为界,0—110 cm 和 110—250 cm 含量呈现出明显差异(图 3)。SiO₂在深度 250—110 cm 含量较高,平均值 77.90%,范围 68.58%—89.57 %;在 0—110 cm 平均值降为 44.06%,范围 30.54%—53.56%。CaO、MgO 在深度 250—110 cm 含量极低,平均值分别为 0.83%、0.67%,分布范围分别为 0.72%—1.05%、0.14%—1.23%;而它们在 0—110 cm 显著增高,平均值分别为 18.67%、3.62%,分布范围分别为

0.87%—27.93%、0.46%—6.23%。Al₂O₃、K₂O 含量在 250—110 cm 为相对高值段,而 110—0 cm 为相对低值段;CaO 则呈现相反的变化趋势。TFe、Na₂O、TiO₂ 含量于深度 250—110 cm 和 110—0 cm 上都在一定范围内波动,这两段没有表现出明显差别。

2.3 微量元素的分布特征

干沟子剖面微量元素 Sr、P、Zr、Cl、Rb、V、Zn、Co、Cu、Pb、Nb、Br 分析结果列于表 3 并绘制于图 4。

表 3 干沟子剖面微量元素含量分布 (ppm)
Table 3 Content distribution of trace element in Gangouzi section (ppm)

沉积层段	数值类型	Sr	P	Zr	Cl	Rb	V	Zn	Co	Cu	Pb	Nb	Br
0—110 cm	最大值	1 371	625	195	1129	76	62	13.2	17.7	21.4	15	9.9	9.9
	最小值	140	117	78	0	32	23	51.6	3.5	6.9	5	5.6	0.9
	平均值	908.52	318.05	112.27	190.25	48.95	44.89	26.08	6.18	12.89	8.68	7.16	3.18
110—250 cm	最大值	152	521	226	205	84	60	38.8	29	18.9	18	11.7	1.4
	最小值	136	172	112	0	58	30	8.6	13.1	4.2	7	8.0	1.2
	平均值	141.29	275.63	172.78	89.07	69.98	42.31	21.27	18.93	9.69	11.85	9.50	1.24
全剖面	最大值	1 371	625	226	1129	84	62	51.6	29.0	21.4	18	11.7	9.9
	最小值	136	117	78	0	32	23	7.0	3.5	4.2	5	5.6	0.9
	平均值	528.36	297.30	142.25	139.41	59.37	43.61	23.70	12.50	11.30	10.25	8.32	2.22
	标准偏差	447.93	117.54	39.02	193.51	13.31	8.19	9.11	7.05	4.01	2.86	1.51	1.84
	变异系数	0.85	0.40	0.27	1.39	0.22	0.19	0.38	0.56	0.35	0.28	0.18	0.82

各微量元素含量差别较大,Sr、Cl 等元素表现出较大的变动范围。按平均值来说,Sr 的含量最高,平均值达 528.36 ppm,P、Zr、Cl、Rb、V、Zn 的平

均值分别为 297.30、142.25、59.37、43.61 ppm 和 23.70 ppm,Co、Cu、Pb、Nb、Br 等的平均值均小于 13 ppm。整个剖面中 Sr 标准偏差最大(447.93),其他

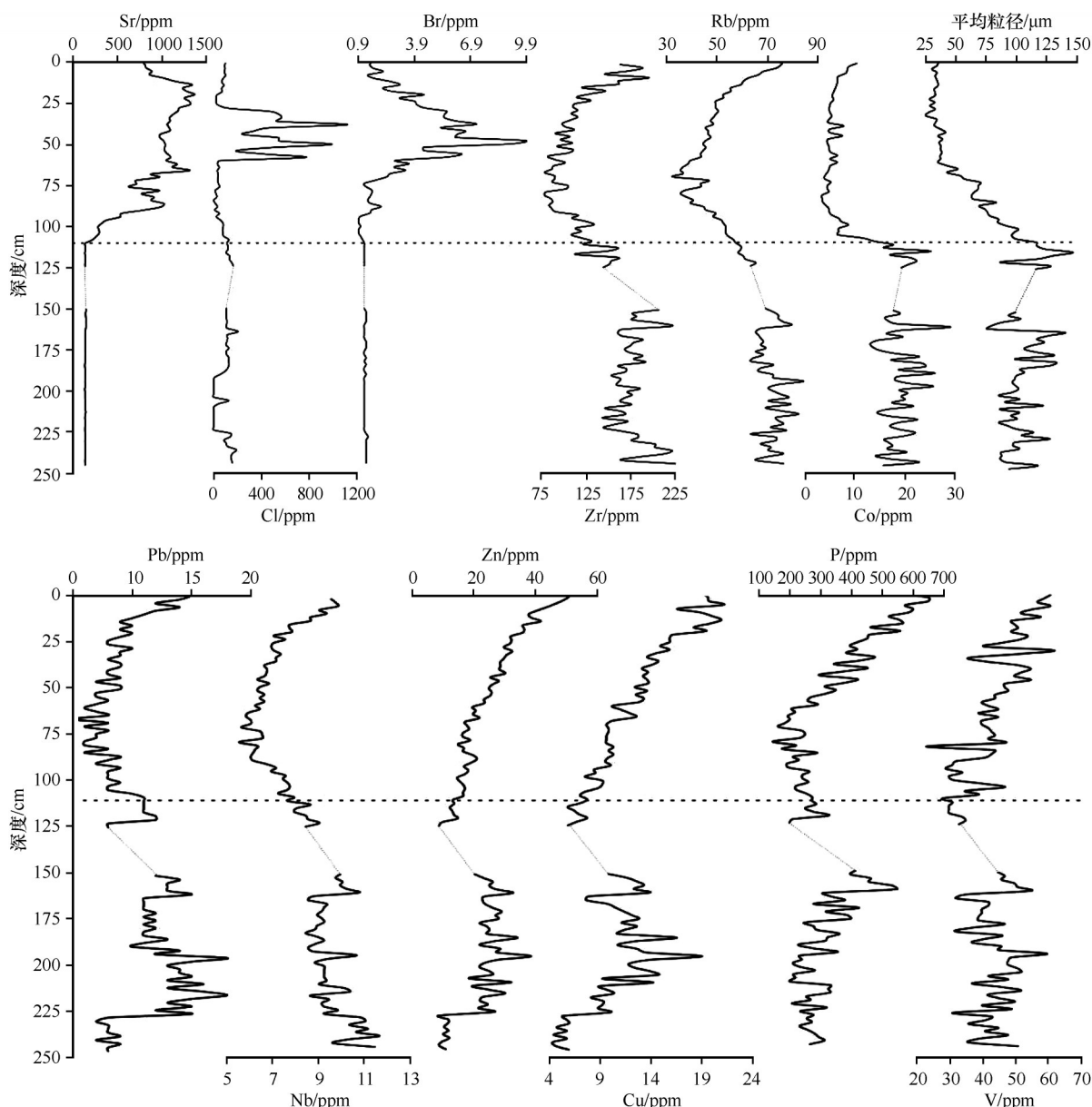


图4 干沟子剖面微量元素含量随深度的变化

Fig.4 Changes of trace element content with depth in Gangouzi section

元素也均在1以上。Sr、Cl、Br的变异系数较大,均大于0.8。表明这三者含量的变化对其他元素含量的影响较大。

从剖面垂向来看,大部分微量元素含量以深度110 cm的位置为界分为明显不同的两段(图4)。Sr、Cl、Br含量在深度250—110 cm含量甚低,平均值分别为141.29、89.07、1.24 ppm,分布范围分别为136—152、0—205、1.2—1.4 ppm;而它们在深度110—0 cm特别是60—25 cm呈现异常增加,平均值分别为908.52、190.25、3.18 ppm,分布范围分别为140—1 371、0—1 129、0.9—9.9 ppm。Zr、Rb、Co、Pb、Nb含量在250—110 cm呈现相对峰值,在110—

0 cm呈现相对谷值。Cu、Zn、P、V含量在垂直方向上呈现在一定范围内波动,它们的含量没有在深度250—110 cm和110—0 cm上呈现出明显的差别高值和低值段。

2.4 地球化学元素主成分分析结果

使用SPSS 20.0软件对8种常量元素氧化物和12种微量元素的含量进行主成分分析。根据主成分分析结果得到了3个主要因子F1、F2、F3,代表了全部信息的86.72%,可以很好地代替20种变量来进行环境解释。其中,F1累积解释的方差达到49.60%,F2累积解释的方差为30.29%,F3累积解释

的方差为 6.82%。根据成分矩阵中各元素与主成分之间的系数关系,选取相关系数绝对值大于 0.5 的元素,得出 F1、F2、F3 所包含的化学元素信息如表 4。F1 因子包含了 SiO₂、Al₂O₃、K₂O、TiO₂、Rb、Co、Zr、Nb、Pb 等 9 个正相关的元素以及 CaO、MgO、Sr 等 3 个负相关的元素;F2 因子包含了 TFe、Na₂O、Cu、Zn、V、P 等 6 个正相关的元素;F3 因子包含了 Cl、Br 等 2 个正相关的元素。

表 4 干沟子剖面 F1、F2、F3 包含的主要化学元素信息
Table 4 Information of main chemical elements contained in F1, F2 and F3 of Gangouzi section

元素	主成分		
	1	2	3
SiO ₂	0.94		
CaO	-0.98		
MgO	-0.76		
Al ₂ O ₃	0.90		
K ₂ O	0.98		
TiO ₂	0.58		
Sr	-0.91		
Co	0.90		
Rb	0.94		
Zr	0.89		
Nb	0.91		
Pb	0.69		
TFe		0.83	
Na ₂ O		0.79	
P		0.86	
V		0.83	
Cu		0.89	
Zn		0.94	
Cl			0.83
Br			0.69

3 干沟子剖面全新世湖泊沉积地球化学元素指示的沉积物来源及其沉积环境

一般来说,在表生地球环境下, SiO₂、Al₂O₃、TFe、TiO₂、Pb、Rb、Nb、Zr、Co 等元素被认为是在表生地球化学条件下相对稳定的元素^[16],气候越干冷,其相对富集程度越低;反之,气候越暖湿,相对

富集程度越高。CaO、MgO、K₂O、Na₂O、Sr、P、V、Cu 和 Zn 等属活动性高-中等的元素^[17],其风化过程中首先遭受淋溶、迁移,气候越暖湿,其淋失越多;气候越干冷,其淋失越少而相对富集。根据主成分分析结果,F1 因子是干沟子剖面地球化学元素主要的贡献来源,其中除 CaO、MgO、Sr 等 3 个元素为负载荷组分外,其余 9 个都为正载荷组分。如前所述, SiO₂ 含量所占比重最大,其含量的增加可能会稀释相应的 CaO、MgO、Sr 含量。但如图 3、4, CaO、MgO、Sr 含量在深度 250—110 cm 很低,在深度 110 cm 以上反而异常增加。这种现象难以仅以 SiO₂ 含量在一定范围内波动导致的“稀释”效应来解释,必然反映具有其他因素在起着极其重要的作用;而沉积物物质来源和沉积环境的改变则往往是不可忽视的。

通过野外考察得知,沿着萨拉乌苏河流域在全新世分布着若干个“古湖泊”,干沟子剖面就在其中一个古湖范围内。从代表全新世古湖的湖泊沉积在空间上的变化来看,其往南、北延伸数千米后逐渐消失,取而代之全新世堆积为黑垆土或风成砂,目前该古湖所在南、北均为高 5—20 m 的风成流动沙丘;而该湖泊沉积在沿东西延伸可达数千米至数十千米,直至到海拔明显升高的偏东的黄土区或偏西的红色砂岩出露区为界。由此可知,此时的干沟子所在湖泊是处于一种相对低洼且封闭的湖盆环境下,其物源可能受偏东区域黄土高原黄土或周围毛乌素沙地的沙丘影响。对于这种低洼的地势条件,通常活动性高-中等的 CaO、MgO、K₂O、Na₂O、Sr、P、V、Cu、Zn 等元素和相对稳定元素 SiO₂、Al₂O₃、TFe、TiO₂、Pb、Rb、Nb、Zr、Co 等都应呈现为相对富集现象^[10]。但在干沟子剖面深度 250—110 cm 的湖泊沉积中,CaO、MgO、Sr 含量很低,并没有明显富集,这说明此时干沟子剖面受富含 CaCO₃ 的黄土的物源影响很小,而主要受本身较低 CaO、MgO、Sr 含量的物源控制。显然,因风成沙丘的基本矿物成分为石英和长石,富含 SiO₂;含有的方解石或白云石较少^[18],因此贫 CaO、MgO、Sr 等。这种结果同样体现在干沟子剖面上游的贺家沟剖面相同时期湖相沉积中^[19]。这正说明干沟子剖面 250—110 cm 湖泊沉积的物源主要为周边的风成砂。该层段的平均粒径多数变化于 80—140 μm 的砂粒级(图 3、4),与粉砂(50—5 μm)为主的黄土^[3]具有明显不同,而与以砂粒级为主的风成砂^[8-11]颇为一致。这也佐证该段

湖泊沉积的物质来源应主要为先前堆积于该古湖周边的古砂丘砂。

干沟子剖面 CaO 、 MgO 、 Sr 在深度 110—0 cm 呈现异常增加,特别是 CaO 含量最高达到 29.93%。根据毛乌素沙地现代地表风成沙和地层中风成砂的 CaO 和碳酸钙含量测试分析,该流域古、今风成砂的 CaO 和碳酸钙含量都较低,往往都小于 0.50%。然而,来自黄土高原的黄土物质则含有较高含量 CaO 和富含 CaCO_3 ^[3]。从这个角度不难理解,干沟子剖面深度 110—0 cm 的沉积物来源应该与富含 CaCO_3 的东南部的黄土高原的黄土密切相关。若与深度 250—110 cm 一样处于相对封闭的湖盆环境,其 CaO 、 MgO 、 Sr 受该古湖盆东、西两段的黄土的影响不大,应该不会呈现如此异常的增加。那么,其富含 CaO 的物质来源就只能来自于该湖盆南部的黄土高原北部白于山一带的黄土。前已叙及,野外考察可知,干沟子剖面的南部先被高 5—20 m 的沙丘所阻隔,逐渐再往南才进入黄土高原。在这种情形下,来自白于山的黄土物质是不可能进入封闭的干沟子所在的湖盆的。然而,干沟子剖面深度 110—0 cm 显然接受了来自其南部白于山的黄土物质,这意味着此时的沉积环境已经发生明显改变。根据目前干沟子剖面附近就是现萨拉乌苏河的上游河段,其自黄土高原北部海拔 1 800—1 600 m 的白于山由南向北流入海拔 1 350—1 300 m 的地势较低区。加之,野外考察发现干沟子剖面南部一号坝至白于山一带,全新世地层表现为下半部为湖泊沉积,上半部土壤突变为黑垆土。根据该河段贺家沟剖面全新世湖相与黑垆土的界限大致为 8.9 ka B.P.^[19],可初步推测该河段在 8.9 ka B.P. 之后湖泊消失。而干沟子剖面所代表的 12.0—6.7 Cal.ka B.P. 湖泊的存在,表明贺家沟 8.9 ka B.P. 之后的湖泊消失不可能是气候变干旱导致的。那么,要导致湖泊的消失,就只能是某种原因导致湖水外泄而没办法保持。显然,目前流经贺家沟剖面的萨拉乌苏河的下切是极为合理的解释。而正是这一河段的产生和过程,使得黄土高原北部白于山富含 CaO 和 CaCO_3 的黄土物质随着河流径流汇入相对低洼的干沟子一带。该层段的平均粒径多数变化于 30—60 μm 的粉砂—极细砂粒级(图 3、4),显示仍受砂粒级为主的风成砂^[8-11]的影响;但与粉砂(50—5 μm)为主的黄土^[3]更为接近,这也佐证黄土物质在该段湖泊沉积的物质来源中起着主导作用。也就是说,起源于白于山的一条由南向北

的河流,由于其下切侵蚀作用,最终在 8.9 ka B.P. 之后使得山前低洼处的湖泊消失,现在的萨拉乌苏上游河段得以形成;该河流之后继续北进且下切,推测大致在 6.7 Cal.ka B.P. (110 cm) 切穿流经的沙丘而最终汇入当时的干沟子一带。如此形成了北、东、西三面相对封闭,并消失于北部沙丘的尾间湖。对于地处半湿润—半干旱背景下的半封闭湖泊而言,其强烈的蒸发必然使得那些易溶元素不断累积,也就能理解干沟子剖面深度在 110—0 cm 处,不仅 CaO 、 MgO 、 Sr 等含量呈现异常高值,而且往往指示海洋性或内陆盐湖的指示标志^[20-21]的 Cl 、 Br 含量也呈现显著峰值。

4 结论

本文基于对萨拉乌苏河流域干沟子剖面地球化学元素特征的分析,结合野外考察,探究其反映的物源及全新世以来的沉积环境。

干沟子剖面常量元素氧化物中,以 SiO_2 含量最高,次为 CaO 和 Al_2O_3 ,其余元素 MgO 、 TFe 、 K_2O 、 Na_2O 、 TiO_2 的含量较低;微量元素以 Sr 的含量最高,次为 P 、 Zr 、 Cl 、 Rb 、 V 、 Zn 、 Co 、 Cu 、 Pb 、 Nb 、 Br 等的含量较低。在剖面垂向上, CaO 、 MgO 、 Sr 、 Cl 、 Br 以 110 cm 为界,含量发生剧烈变化,在 250—110 cm 为明显低值段,而 110—0 cm 为显著高值段,其余元素多与它们呈现相反的变化趋势或表现为一定范围内的波动。结合剖面垂向和主成分分析结果可知干沟子剖面地球化学元素含量主要受 CaO 、 MgO 、 Sr 等活泼性元素的影响。

结合野外考察和粒度分析结果,从干沟子剖面地球化学元素特征可以推测:12.0—6.7 Cal.ka B.P. 剖面所在古湖为相对封闭环境,其物源主要受周围毛乌素沙地沙丘来源影响;6.7—2.2 Cal.ka B.P. 由于来自黄土高原北部白于山的萨拉乌苏河的下切并最终汇入相对低洼的干沟子一带,使得该剖面所在古湖转为南部一条河流汇入,且北、东、西三面相对封闭,并消失于北部沙丘的尾间湖。因此,干沟子剖面深度在 250—110 cm 和 110—0 cm 在地球化学元素特征上的差异主要体现的是沉积物物源的改变导致的。

参考文献:

- [1] O'Brien S R, Mayewski P A, Meeker L D, et al. Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core

- [J]. *Science*, 1995, 270(5244): 1962–1964.
- [2] 张振克, 吴瑞金, 王苏民. 岱海湖泊沉积物频率磁化率对历史时期环境变化的反映[J]. *地理研究*, 1998(3): 74–79.
- [3] 孙建中. 黄土高原第四纪[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [4] Wang S Y, Lü H Y, Liu J Q, et al. The early Holocene optimum inferred from a high-resolution pollen record of Huguangyan Maar Lake in southern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(20): 2829–2836.
- [5] Hu C, Henderson G M, Huang J, et al. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 266(3/4): 221–232.
- [6] 王绍武. 全新世北大西洋冷事件: 年代学和气候影响[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(6): 1146–1153.
- [7] 洪业汤, 姜洪波. 近 5 000 a 的气候波动与太阳变化[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(6): 491–497.
- [8] 张宇红, 李保生, 靳鹤龄, 等. 萨拉乌苏河流域 150 ka BP 以来的粒度旋回[J]. *地理学报*, 2001(3): 332–344.
- [9] 罗开利, 李保生, 余雪飞, 等. 150 ka B.P. 以来萨拉乌苏河流域的 CaCO_3 旋回[J]. *地理科学*, 2002, 22(6): 683–688.
- [10] 李后信, 李保生, 祝一志, 等. 150 ka B.P. 以来萨拉乌苏河流域主元素变动旋回[J]. *地球化学*, 2002(5): 424–432.
- [11] 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.
- [12] 王丰年, 李保生, 牛东风, 等. 毛乌素沙漠东南缘 DGS1 层段 CaCO_3 记录的全新世气候变化[J]. *地球环境学报*, 2015, 6(3): 145–153.
- [13] 中国大百科全书总编辑委员会《中国地理》编辑委员会. 中国大百科全书: 中国地理[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1993.
- [14] 杨永梅, 杨改河, 冯永忠. 近 45 年毛乌素沙地的气候变化及其与沙漠化的关系[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007(12): 87–92.
- [15] 王丰年, 李保生, 牛东风, 等. 萨拉乌苏河流域 MGS1 层段粒度与 CaCO_3 记录的全新世千年尺度的气候变化[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(2): 331–339.
- [16] 关有志, 陈振英, 贾惠兰. 萨拉乌苏河地区第四纪地层中的元素分布与古气候[J]. *中国沙漠*, 1986, 6(1): 36–39, 45.
- [17] Li B S, Zhang D D, Jin H L, et al. Palaeomonsoon 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): 112–128.
- [18] 董光荣, 李保生, 陈永志. 萨拉乌苏河晚第四纪地质与古人类综合研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [19] 李想. 毛乌素沙地全新世气候变化与地貌演化初步研究[D]. 太原: 山西大学, 2020.
- [20] 张虎才. 元素表生地球化学特征及理论基础[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1997.
- [21] 毛庆飞. 内蒙古腾格里沙漠盐湖元素及同位素地球化学研究[D]. 北京: 中国科学院大学.

Geochemical characteristics of holocene lacustrine sediments in Gangouzi section and its sedimentary sources in the Salawusu River Valley

Zhou Weixin^{1,2}, Wen Xiaohao¹, Li Baosheng^{1,3}, Wang Chen¹, Tian Mengyuan¹, Qiu Mingqun¹

(1.School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 2.Zhuzhou Eighth Middle School, Zhuzhou 412008, Hunan, China; 3.State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to explore the source and sedimentary environment of lacustrine sediments in the middle and upper reaches of Salawusu River Valley, the ages of three dating samples and the contents of chemical elements in 113 samples were measured, the origin of sediments reflected by the geochemical characteristics of Gangouzi section was analyzed, and the changes of sedimentary environment since Holocene was discussed. The results show that the contents of CaO, MgO, Sr, Cl and Br change dramatically with the boundary of 110 cm in the vertical direction of the section, showing obvious low value at 250–110 cm, and obvious high value at 110–0 cm. The change of provenance is the main reason for the significant increase of CaO, MgO, Sr, Cl, Br at the depth of 110–0 cm; The paleo-lake in the 12–6.7 Cal.ka B.P. (250–110 cm) was a relatively closed environment, and its provenance was mainly influenced by the source of surrounding dunes; in the 6.7–2.2 Cal. ka B.P. (110–0 cm), the lake changed into a semi-closed environment, the river (upper reaches of the Salawusu River of today) rises in Baiyu Mountain (in the northern Loess Plateau) and into the south of the lake, its material source is profoundly influenced by the material of the loess brought in by the river.

Key words: Salawusu River Valley; Holocene; gangouzi section; geochemical element; provenance