

胡梦琚,郑登友,吉天琪,等.晚更新世早期共和盆地湖相沉积常量元素地化学特征及环境演变[J].中国沙漠,2022,42(1): 147-157.

# 晚更新世早期共和盆地湖相沉积常量元素地化学特征及环境演变

胡梦琚,郑登友,吉天琪,庄静,孙文丽

(西北师范大学 地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070)

**摘要:**对共和盆地过马营沙沟湖相沉积剖面常量元素氧化物及比值特征进行分析,结合光释光测年,探讨了共和盆地晚更新世早期的环境演变。结果表明:(1)SiO<sub>2</sub>和Na/K自剖面底部向上大致呈现出一谷两峰的变化特征,整体波动增大,高值均出现在细砂层,指示冷干气候;低值出现在粉砂层,指示温湿气候;(2)CaO、MgO与CIA值自剖面底部向上大致呈现出一峰两谷的变化特征,整体呈现波动减小的态势,高值均出现在粉砂层,指示湿润气候;低值出现在细砂层,指示冷干气候;(3)共和盆地气候在90—70 ka存在3次明显的冷干-温湿波动,可分为MIS 5b(91.5—89.4 ka)气候由湿润向凉干方向发展的共和古湖低水位期、MIS 5a(89.4—80.1 ka)气候温湿的湖泊高水位期和MIS 4(80.1—70.1 ka)气候冷干的湖泊萎缩期。

**关键词:**共和盆地;常量元素氧化物;水成沉积;环境演变

**文章编号:** 1000-694X(2022)01-147-11

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00142

**中图分类号:** P595

**文献标志码:** A

## 0 引言

晚更新世早期的气候变化是古气候演化研究的热点。共和盆地位于青藏高原东北部,地处东亚季风和西风环流的交界处,对气候变化反应灵敏,是研究环境演变的理想场所<sup>[1]</sup>。黄土-古土壤是重建古环境的重要载体,许多学者通过元素<sup>[2-5]</sup>、粒度<sup>[6-9]</sup>、磁化率<sup>[10-11]</sup>、黏土矿物<sup>[12-13]</sup>、色度<sup>[14]</sup>建立了共和盆地及周边地区的高分辨率古气候序列。许多研究揭示了末次间冰期-末次冰期气候变化的明显不稳定性,无论是夏季风还是冬季风均表现出千年尺度上的急剧变化<sup>[15-17]</sup>。共和盆地自早更新世以来由偏湿气候逐渐转变为干旱气候,早期为湖相沉积段,晚期为河流和风成沉积段<sup>[18]</sup>。众多学者在此虽进行了大量研究,但主要在风成沙-黄土-古土壤反演古环境、全新世以来古气候环境变化等几个方面,对晚更新世早期、水成剖面研究较少。高原湖泊沉积环境相对稳定、沉积序列具有连续性和高分辨率的特点<sup>[19]</sup>,是恢复和重建古气候、古环境的重要载体。本文选取共和盆地典型湖相沉积过马营

沙沟剖面,运用常量元素及其比值,结合OSL测年,恢复了共和盆地90—70 ka的环境演变过程。此研究丰富了共和盆地第四纪以来环境演变载体,对预测未来气候演变趋势以及指导共和盆地的生态建设具有重要的科学意义。

## 1 研究区概况

共和盆地(35°37'—36°35'N,98°46'—101°22'E)位于青藏高原的东北缘,在秦岭山系和昆仑山系之间,是典型的新生代断陷盆地<sup>[20]</sup>,整体呈西北-东南走向,海拔2 250—4 642 m。地势西北高、东南低,北接青海南山,东临西倾山,南傍河卡山、鄂拉山,形成了四周群山环绕的封闭式山间内陆盆地。共和盆地属于典型的高寒-干旱半干旱大陆性气候,干燥寒冷,降水少,变率大,年均气温1.0—5.2℃,年降水量311—402 mm,年蒸发量1 528—1 937 mm<sup>[21]</sup>;共和盆地风频高、风力大,冬春季多大风<sup>[22]</sup>。盆地地表水包括内流的沙珠玉河和外流的黄河两大水系,黄河支流茫拉河和沙沟河流量小,含沙量较高。

收稿日期:2021-08-07; 改回日期:2021-10-12

资助项目:国家自然科学基金项目(41171018,41161036)

作者简介:胡梦琚(1974—),女,甘肃庆阳人,博士,副教授,主要研究方向为寒旱区环境演变与元素地球化学。E-mail: lele200466@163.com

植被以典型的草原、荒漠草原和高寒草原为主;土壤以栗钙土、棕钙土、风沙土、草甸土、沼泽土为主<sup>[23]</sup>。

## 2 剖面概况与研究方法

### 2.1 剖面概况与采样方法

过马营沙沟剖面(SG剖面)位于共和盆地东部沙

沟右侧支沟左岸公路旁(35°52′05″N,101°04′57″E,图1),剖面海拔2 900 m,总厚度6.44 m(图2)。对过马营沙沟剖面进行高密度连续采样,0—636 cm按2 cm、636—644 cm按4 cm间隔,共采集土壤样品320个;同时在SG剖面顶部和底部沉积质地明显差异处采集4个光释光样品。

SG剖面为湖相沉积剖面,根据野外观察剖面岩性特征及室内粒度分析,将SG剖面地层细分为6

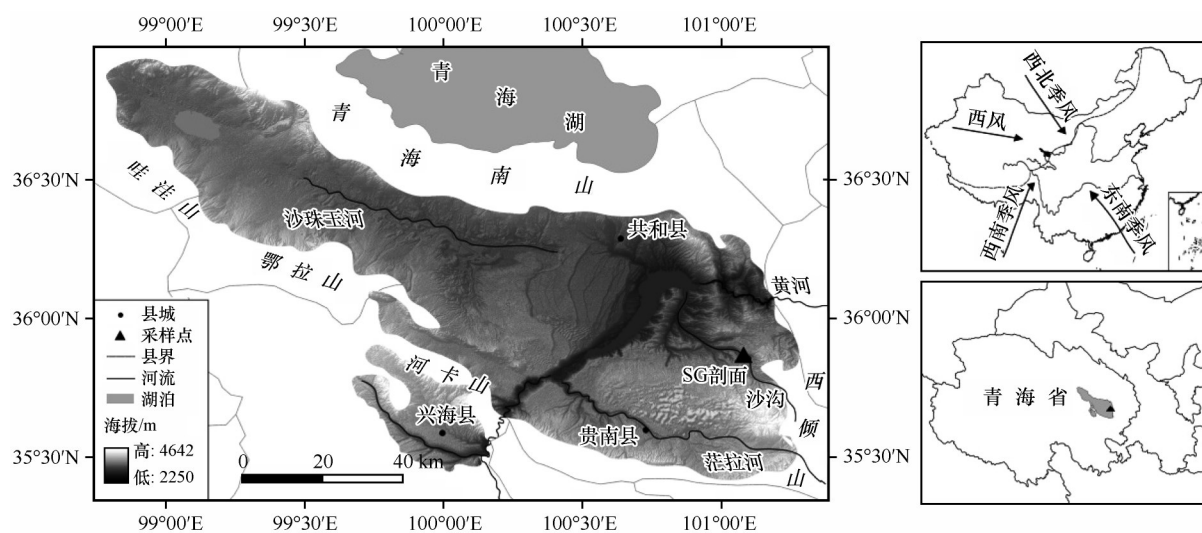


图1 研究区概况

Fig.1 Location of the studied area

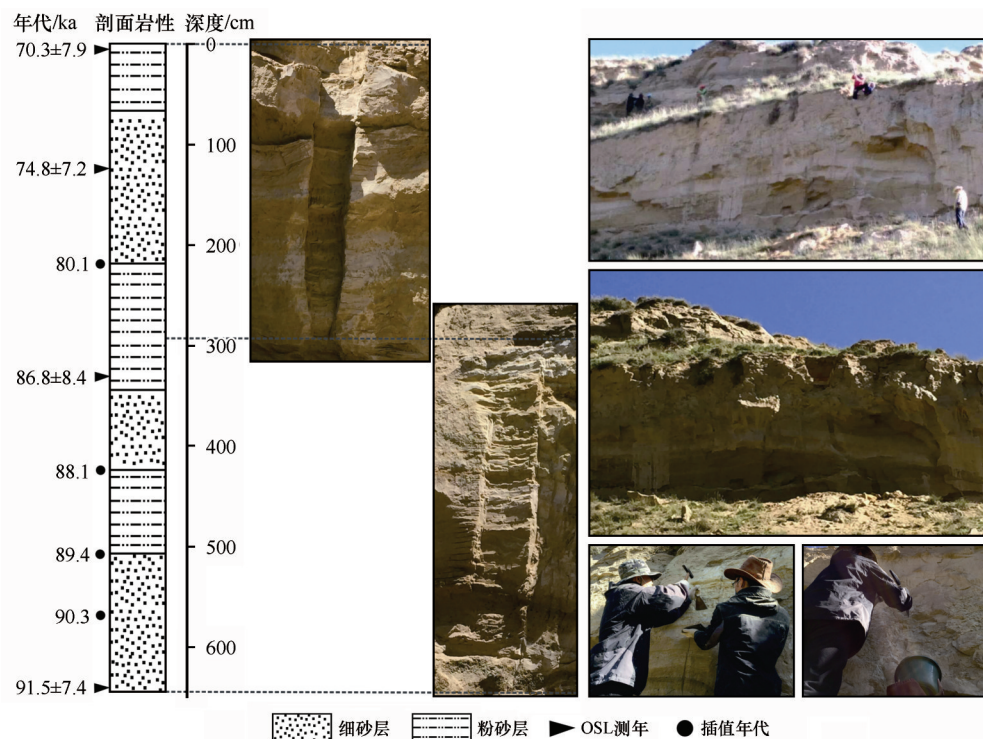


图2 过马营沙沟SG剖面地层图

Fig.2 Layers of the SG profile

层,具体形态特征描述如表 1。

2.2 实验方法

样品经室内自然风干、去除植物根系和杂质后过筛,在中国科学院西北生态环境资源研究院沙漠与沙漠化重点实验室进行化学元素测定。称取干燥样

品 4 g 用 ZHM-1A 振动磨研磨至 200 目以下,研磨样品以硼酸作底用 ZHY-401A 半自动压样机压制成圆饼,采用荷兰帕纳科公司生产的 Axios 型 X 射线荧光光谱仪进行元素测定。测定的常量元素包括硅(Si)、铝(Al)、铁(Fe)、镁(Mg)、钙(Ca)、钠(Na)和钾(K),结果以氧化物形式给出,单位为%,测定误差<5%。

表 1 SG 剖面地层特征  
Table 1 Stratigraphic characteristics of SG profile

编号	深度/cm	地层	特征描述
SG1	0—70	粉砂层	黄褐色粉砂层,上覆有 0.14 m 的白色粉砂层,较紧实,粗粉粒占 48%—53%
SG2	72—218	细砂层	褐灰色细砂层,偶现粗砂粒,沉积层疏松,砂粒占 50%—80%
SG3	220—344	粉砂层	黄棕色、灰白色湖泊沉积物,灰白色沉积层坚实,黄棕色沉积层紧实,粉粒占 60%—89%
SG4	346—418	细砂层	黄棕色细砂层,较紧实,细砂粒占 50%—70%
SG5	420—504	粉砂层	灰白色细砂和粉砂交互层,紧实,粉粒占 50%—80%
SG6	506—644	细砂层	可细分 3 层,上层黄棕色细砂,中部褐灰色较粗细砂,下部黄棕色细砂,上下层较紧实,中部疏松,砂粒占 50%—90%

光释光样品在中国科学院青海盐湖研究所通过 RisTL/OSL-DA-20 全自动释光仪测定,辐照源为 (90Sr/90Y)β 源,SG 剖面 644 cm 涵盖了 91.5±7.4—70.3±7.9 ka 的地层年龄(表 2),并对 SG 剖面进行年代内插(图 2)。

表 2 SG 剖面 OSL 测年结果  
Table 2 The date of OSL ages of the SG profile

样品 编号	深度 /cm	剂量 /(Gy·ka <sup>-1</sup> )	De/Gy	年龄(BP) /ka
4	4—8	5.55±0.58	390.3±16.0	70.3±7.9
3	124—128	5.07±0.35	379.5±25.9	74.8±7.2
2	332—336	4.64±0.32	403.1±27.4	86.8±8.4
1	640—644	4.34±0.30	396.8±16.4	91.5±7.4

表 3 SG 剖面常量元素含量(%)分布  
Table 3 Content distribution of major elements of the SG profile

常量 元素	地层						范围	剖面均值	标准偏差
	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	SG6			
SiO <sub>2</sub>	67.85	70.35	56.29	65.25	68.07	70.37	40.84—73.39	66.42	7.11
CaO	4.31	3.85	9.62	4.29	1.76	3.87	0.54—21.05	4.81	3.87
Na <sub>2</sub> O	2.28	2.38	1.99	2.20	2.31	2.39	1.66—2.62	2.26	0.20
MgO	1.27	1.03	1.78	1.45	1.49	1.02	0.79—2.28	1.31	0.35
K <sub>2</sub> O	2.07	1.91	2.09	2.11	2.24	1.95	1.68—2.64	2.04	0.16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.81	3.13	4.05	3.93	4.07	3.21	2.60—8.94	3.62	0.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.96	10.12	11.22	11.47	12.15	10.44	8.69—13.83	10.93	0.93



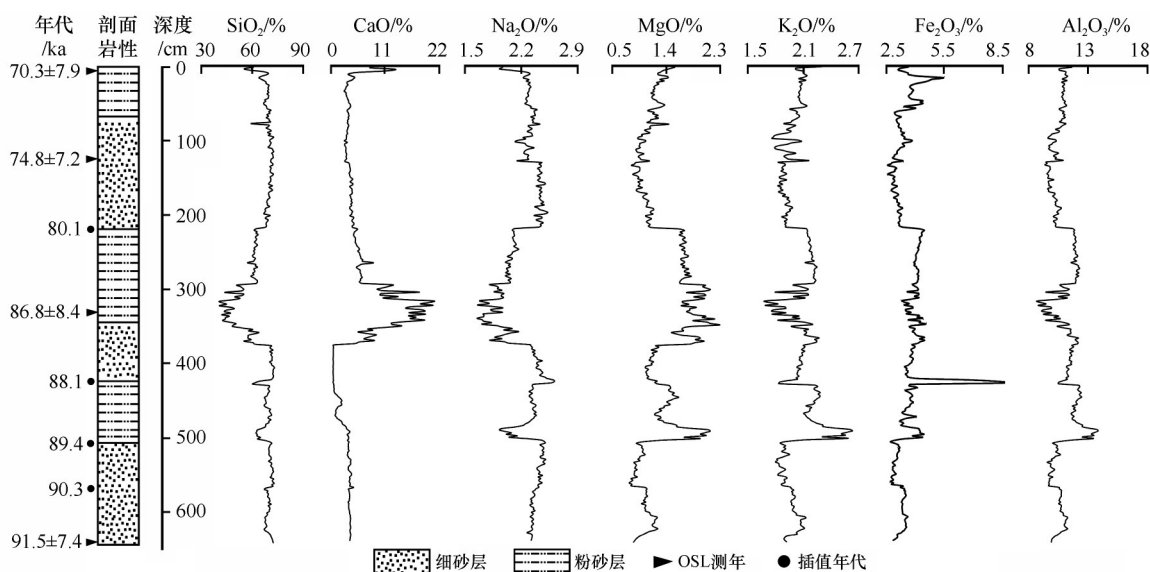


图3 SG剖面常量元素含量变化曲线

Fig.3 Variation curves of major elements in the SG profile

低,在SG4、SG3出现明显的谷区。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量自底部向上先逐渐增大后逐渐减小, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 各层平均含量变化为SG5(12.15%)>SG4(11.47%)>SG3(11.22%)>SG1(10.96%)>SG6(10.44%)>SG2(10.12%), $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 平均含量变化为SG5(4.07%)>SG3(4.05%)>SG4(3.93%)>SG1(3.81%)>SG6(3.21%)>SG2(3.13%)。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (13.83)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (8.94)最高值均出现在SG5, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (2.60)最低值在SG2,大致经历了一峰两谷的变化。 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 含量变化与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 趋势略为一致, $\text{Na}_2\text{O}$ 曲线趋势与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 相反。 $\text{CaO}$ 含量曲线和 $\text{SiO}_2$ 相反,最高值为21.05。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 含量在粉砂层中出现明显峰值, $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量为谷值; $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 在细砂层中出现谷值, $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 在细砂层中出现峰值。

### 3.2 常量元素比值变化特征及风化程度

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 反映湖泊及周边地区的淋溶作用的强度,主要受径流输送的外源物质控制<sup>[24]</sup>;高值表明气候冷干,低值指示暖湿气候。 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值先波动减小后波动增大(图4),为一谷两峰的变化趋势,剖面各层 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 平均值变化为SG2>SG6>SG1>SG4>SG5>SG3,全剖面最大值出现在SG2(11.82),最小值出现在SG3(8.49),平均值为10.39,总体为细砂层值高于粉砂层,SG剖面中细砂层化学风化强度弱于粉砂层。

$\text{Na/K}$ 主要指示湖泊盐度<sup>[25]</sup>:高值表明盐度较

高,气候冷干;低值指示暖湿气候。 $\text{Na/K}$ 变化趋势和 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 一致,自底部向上先波动减小后波动增大(图4)。剖面中各层 $\text{Na/K}$ 值变化为SG2>SG6>SG1>SG4=SG5>SG3,剖面范围为1.11—2.15,平均值1.70。SG2、SG6、SG4层值较大,SG3、SG5层值较小,SG剖面化学风化程度细砂层弱于粉砂层。

$w$ (退碱系数)指示着化学元素的淋溶迁移<sup>[25]</sup>, $w$ 值增大,表明沉积气候环境处于干旱期; $w$ 值减小,则表明气候暖湿。 $w$ 值自底部向上呈增大趋势,仅出现一个明显峰值(图4)。SG剖面中 $w$ 值0.61—4.93,平均1.37。SG剖面下部细砂层 $w$ 值高于粉砂层:SG6(1.26)>SG4(1.20)>SG5(0.77);SG剖面上部 $w$ 值高于剖面下部:SG3(2.16)>SG2(1.28)>SG1(1.26)>SG6(1.26)>SG4(1.20)>SG5(0.77),表明该剖面化学风化程度逐渐减弱。

$K_i$ (残积系数)指示着风化淋溶作用的强弱<sup>[26]</sup>: $K_i$ 值增大,风化淋溶作用较强,气候温暖湿润; $K_i$ 值小,风化淋溶作用弱,气候干旱。 $K_i$ 值自底部向上先增大后波动减小,整体为减小趋势, $K_i$ 值0.24—1.92,平均0.97(图4)。从垂向分层来看, $K_i$ 各层平均值为SG5>SG4>SG1>SG6>SG2>SG3,整体而言粉砂层 $K_i$ 值大于细砂层。SG剖面峰值区出现在SG5(1.42),谷值区出现在SG3(0.63),表明剖面上部粉砂层风化程度比下部粉砂层弱。整体而言,SG剖面中粉砂层化学风化程度强于细砂层,剖面化学风化程度呈减弱的趋势。

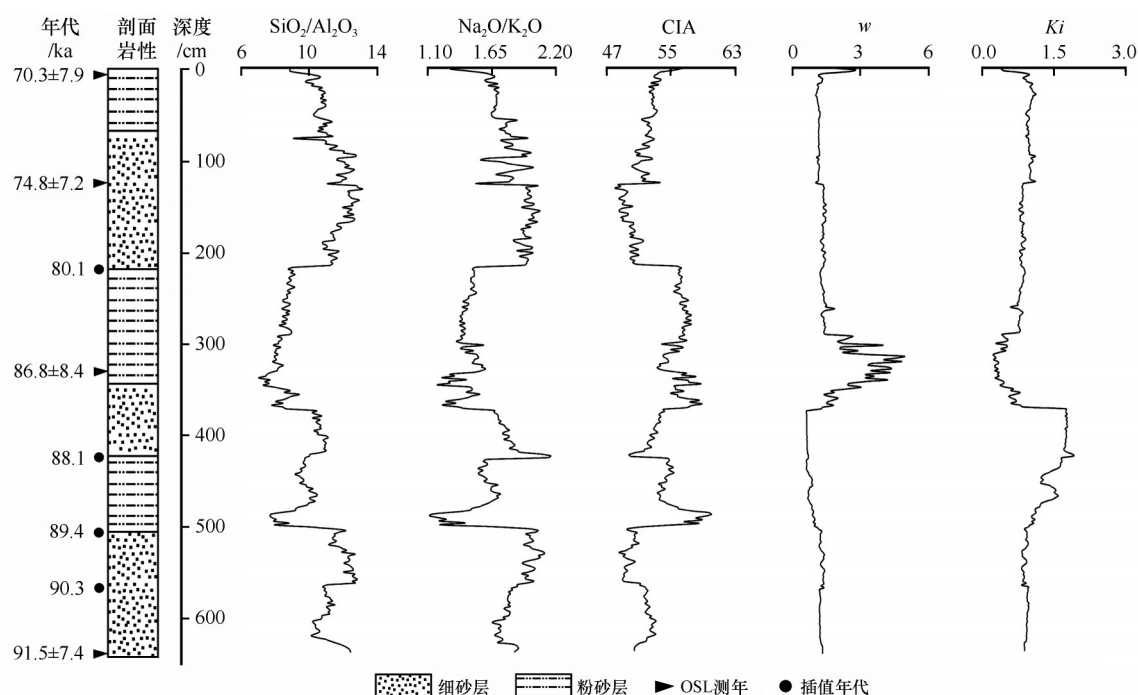


图4 SG剖面常量元素氧化物比值的垂直变化

Fig.4 Vertical variation of major element oxide ratio in SG profile

CIA(化学蚀变指数)指示长石风化成黏土矿物的程度,是一个判断沉积地区化学风化程度的地球化学指标<sup>[27]</sup>。CIA值越大,化学风化越强,气候越暖湿;反之,化学风化相对较弱,气候越冷干。SG剖面CIA值48.06—60.05,平均53.04,最小值出现在SG2,最大值在SG5。CIA指数各层平均值变化为SG3>SG5>SG4>SG1>SG6>SG2,变化趋势和SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na/K正好相反。SG剖面整体是处于低等化学风化程度,其中SG3层形成时期化学风化作用最强,SG2层时期化学风化作用最弱。

A-CN-K三角图是Nesbitt等<sup>[28]</sup>提出用于反映化学风化趋势以及化学风化过程中主要成分和古气候环境变化的参数模型。将SG剖面样品分析结果在A-CN-K三角图上进行投点(图5),样品的风化趋势大致与A-CN线平行,靠近斜长石一边,表明剖面中的斜长石最先分解,Ca、Na迅速流失。SG剖面样品投射点分布集中,沉积物的趋势线与A-CN线基本一致。SG剖面处于早期去Ca、Na阶段,为初级风化程度。

### 3.3 常量元素氧化物及其比值古气候意义

自然条件下,湖泊沉积物中的无机化学元素主要有两种来源:一是流域侵蚀带来的外源碎屑组分;二是湖泊水体中各种物理、化学及生物过程所

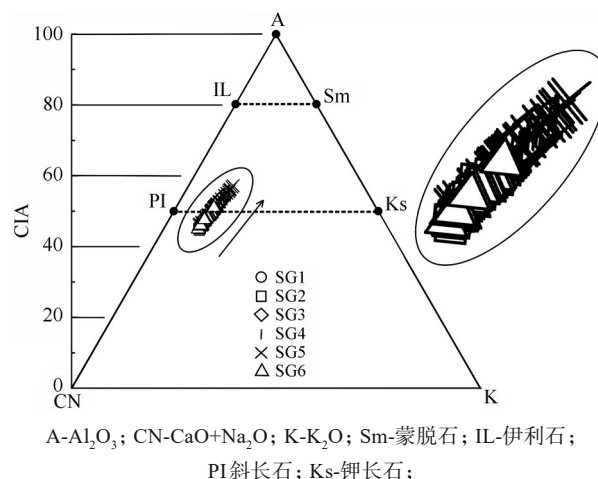


图5 SG剖面沉积物的A-CN-K三角图

Fig.5 A-CN-K triangulation of the SG profile sediment

产生的内生沉淀组分<sup>[29-30]</sup>。其化学元素的组成受多种环境因素的综合影响,一方面与元素的赋存状态、固有的地球化学行为有关,另一方面又与沉积环境的物理化学条件相关<sup>[29]</sup>。湖泊沉积物的化学组成与湖泊水化学条件有关且又受制于湖盆流域的地质、地球化学背景和风化作用强度,而这两者的变化均与气候变化密切相关<sup>[31]</sup>。高原湖泊沉积物以陆源碎屑物输入为主<sup>[32]</sup>,地化学元素的迁移和聚集主要受气候的影响<sup>[33]</sup>。

由于常量元素活性差异较大,表现出不同的

迁移和聚集特征。一般而言,  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  活动性最强, 在气候暖湿的条件下, 易呈离子或者胶体状态随径流汇入湖泊<sup>[29,34]</sup>。 $\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}$  活动性中等, 在过渡性气候条件下最容易溶解、迁移、富集。生物作用和黏土物质对  $\text{K}$  的富集作用使湖泊沉积物中  $\text{K}$  含量较高<sup>[35]</sup>。SG 剖面中,  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  易富集在粉砂层, 细砂层含量少, 表明  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$  高值指示湿润气候。 $\text{Al}$ 、 $\text{Fe}$  活动性稳定, 属于惰性组分。在气候湿润时期, 径流发育, 惰性组分大量以颗粒的形态被径流冲刷而迁移到湖泊, 并直接以物理沉降的形式淀积在湖底<sup>[29]</sup>。 $\text{Si}$  比较稳定, 在温湿气候条件下, 风化淋溶作用下  $\text{Si}$  发生迁移, 而  $\text{Al}$ 、 $\text{Fe}$  相对富集。SG 剖面中, 在粉砂层  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量较高, 细砂层  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  含量较高, 表明  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  高值指示温湿气候,  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  高值指示冷干气候。

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  高值指示气候干凉, 低值指示气候温湿, 剖面中  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  可作为冬季风强度的替代性指标<sup>[25]</sup>。 $w$  反映了活动组分与惰性组分之间的关系; SG 剖面中,  $w$  值低, 表明进入湖泊的惰性组分较多, 源区的风化作用较强, 气候湿润; 反之, 气候干旱。 $\text{Na}$  和  $\text{K}$  是活性极强的碱金属元素, 并且在水体中分布均一, 其含量是盐度的直接标志。在还原条件下, 水体盐度越高,  $\text{Na}$  和  $\text{K}$  越容易被伊利石吸附或进入晶格, 且相对于  $\text{Na}$ 、 $\text{K}$  元素的吸附量更大<sup>[36]</sup>; 在 SG 剖面中,  $\text{Na}/\text{K}$  高值反映湖泊水体盐度较高, 气候较干旱; 反之说明气候温湿,  $\text{Na}/\text{K}$  可较为直接地反映出湖泊水位及周边气候变化。 $K_i$  反映淋溶迁移作用强弱, 高值指示化学风化作用强, 气候温湿; 低值指示冷干气候。 $\text{CIA}$  可有效地指示长石风化成黏土矿物的程度, 值越高, 气候越温湿。Nesbitt 等<sup>[37]</sup>根据元素活动性顺序将化学风化过程划分为 3 个阶段, SG 剖面处于  $\text{Ca}$ 、 $\text{Na}$  流失的初级风化程度。

在 276—368 cm 层,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{SiO}_2$  变化趋势相同, 出现低谷区,  $\text{CaO}$  含量出现最大值。在此期间气候整体水热状况较好, 湖泊水位高, 湖泊中水生植物和浮游生物增多, 导致  $\text{CaCO}_3$  沉淀, 形成了大量  $\text{CaO}$ <sup>[38]</sup>。生物作用和黏土物质对  $\text{K}$  的富集作用使湖泊沉积物中  $\text{K}$  含量较高, 但由于 SG 剖面地处青藏高原东北部, 气温较低, 整体水热条件达不到形成  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的程度, 表明此阶段属于过渡环境。剖面中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  指示气候湿润程度, 对过渡性阶段

气候变化反应较为灵敏。

### 3.4 湖泊沉积环境

$\text{Na}/\text{K}$ 、 $\text{Ca}/(\text{Fe}+\text{Ca})$  为古湖泊水体盐度判别的敏感指标<sup>[39]</sup>。 $\text{Ca}/(\text{Fe}+\text{Ca})$  值 0.15—0.95, 平均 0.72,  $\text{Na}/\text{K}$ 、 $\text{Ca}/(\text{Fe}+\text{Ca})$  高值指示盐度较高, 湖泊萎缩。SG5 出现  $\text{Ca}/(\text{Fe}+\text{Ca})$  值低谷区且值低于 0.5, 表明 SG5 为低盐度淡水环境, 而剖面整体为高盐度半咸水环境。 $\text{Mg}/\text{Ca}$  值 0.11—3.15, 平均 0.70, 自底部向上呈降低趋势, 表明  $\text{Mg}/\text{Ca}$  值越低指示湖泊碱性越强<sup>[40]</sup>, SG 剖面属于碱性环境。因此 SG 湖相沉积剖面形成于高盐度半咸水、碱性环境。

## 4 环境演变过程

根据剖面地球化学元素及其比值变化特征所记录的环境信息, 结合沉积相特征和 OSL 测年结果, 将 SG 剖面 90—70 ka 划分为 2 个主要时期: MIS 5 (91.5—80.1 ka)、MIS 4 (80.1—70.1 ka), 在末次间冰期—末次冰期之间存在暖峰和冷阶, 各阶段气温差异大, 在各阶段中还存在一系列数百年、千年级的的气候波动(图 6)。

### 4.1 末次间冰期 MIS 5 环境演变

#### 4.1.1 末次间冰期 MIS 5b

MIS 5b (91.5—89.4 ka) 时期, 对应于 SG6 层,  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}/\text{K}$  出现峰值区, 自底部向上呈先减小后增大的态势。 $\text{MgO}$ 、 $\text{CIA}$  处于谷值区, 自底部向上变化趋势为先增大后减小;  $w$  自底部向上呈增大的趋势,  $K_i$  值逐渐减小。共和古湖盐度升高, 风化作用减弱, 湖泊萎缩, 表明 MIS 5b 气候由湿润向凉干方向发展, MIS 5b 可划分为两个阶段(MIS 5b 早期和 MIS 5b 晚期):

MIS 5b 早期 (91.5—90.3 ka): 剖面深度 644—564 cm, 对应于 SG6 层下部。 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量曲线出现弱峰,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  值较低,  $\text{CIA}$ 、 $K_i$  值较高, 表明东亚夏季风强, 降水较多, 风化作用较强, 湖泊盐度较低, 共和古湖水位略微升高, 气候湿润; 这与石笋 YK1327 记录的亚洲夏季风增强事件<sup>[42]</sup>、30°N 夏季太阳辐射量增大的吻合度高, 但总体而言 MIS 5b 时期共和古湖仍处于一个较低水位时期。

MIS 5b 晚期 (90.3—89.4 ka): 剖面深度 564—504 cm, 对应于 SG6 层上部。 $\text{SiO}_2$  含量较高,  $\text{MgO}$



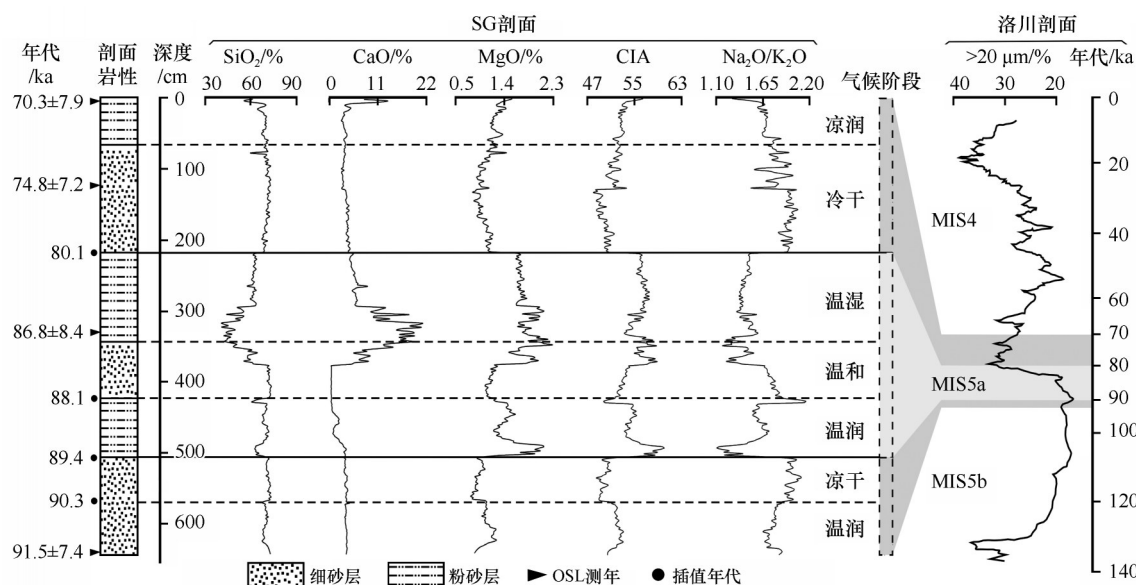
图6 SG剖面地球化学指标与洛川剖面粒度<sup>[41]</sup>揭示的气候变化及对比

Fig.6 Climate change revealed by geochemical indexes of SG profile and grain size of Luochuan profile

处于谷值区。CIA值快速减小、Na/K值出现峰值区,说明影响青藏高原东北部地区的夏季风减弱、冬季风增强,降水减少,淋溶作用较弱,湖泊盐度升高,共和盆地气候凉干。

MIS 5b为末次间冰期的冷期,气候整体表现出湿润的特点。同期巴丹吉林沙漠东南部湖泊水位降低<sup>[43]</sup>、黄土高原西部北塬剖面CaCO<sub>3</sub>含量增加<sup>[44]</sup>、九州台剖面发育了S<sub>1L</sub>层、芬诺斯堪的纳维亚冰盖扩张<sup>[45]</sup>均表明MIS 5b气候较干。

#### 4.1.2 末次间冰期 MIS 5a

MIS 5a(89.4—80.1 ka)时期,对应于SG3、SG4、SG5层,SiO<sub>2</sub>、Na/K为谷值区,CaO、MgO、CIA、Ki为峰值区,但曲线出现了次一级一谷两峰或一峰两谷的变化。这揭示出MIS 5a时期化学风化作用强,盐度降低,降水较多,整体气候呈现温湿特点,夏季风经历了增强—衰减—增强的波动。这与共和盆地茫拉剖面发育黄土层<sup>[46]</sup>、青藏高原东北部合作盆地粒径较细<sup>[47]</sup>、洛川剖面处于砂粒谷值区<sup>[41]</sup>揭示的气候意义一致,降水较多,气候湿润。同期青土湖水域面积扩张<sup>[48]</sup>、临夏北塬剖面发育了S<sub>1-1</sub>层褐土型古土壤<sup>[49]</sup>、南海海平面上升<sup>[50]</sup>均表明此阶段进入到末次间冰期。MD95-2036<sup>[51]</sup>、王官剖面<sup>[52]</sup>及格陵兰NGRIP冰芯<sup>[53]</sup>记录均表明MIS 5a为两暖夹一冷的形式,说明共和盆地地区气候变化具有全球性。依据气候代用指标的变化和气候波动,可进一步将MIS 5a划分为3个阶段(MIS 5a早期、MIS 5a中期

和MIS 5a晚期)。

MIS 5a早期(89.4—88.1 ka):剖面深度504—418 cm,对应于SG5层。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为峰值区,且出现了次一级的气候波动,元素比值出现明显突变,表明此阶段气候产生剧烈波动。Na/K出现低谷区,CIA骤然增大,风化程度增强,盐度降低,湖泊水位上升,湖泊扩张,反映区域降水增多,气候湿润;同期青藏高原进入MIS 5大湖期<sup>[54]</sup>,湖泊水位上升。

MIS 5a中期(88.1—86.9 ka):剖面深度418—344 cm,对应于SG 4层。SiO<sub>2</sub>含量下降,CaO含量上升。MgO、CIA值处于小谷区,Na/K出现小峰区,Na/K仍处于剖面低值区。这揭示出夏季风强度减弱,降水较少,湖泊盐度升高,湖泊水位有所下降,但仍然处于共和古湖高湖面时期,气候温和偏干。

MIS 5a晚期(86.9—80.1 ka):剖面深度344—218 cm,对应于SG3层。MgO出现明显峰值,Na/K值减小,SiO<sub>2</sub>出现最低值,CIA、CaO出现最高值。表明此阶段夏季风强盛、化学风化强,降水达到最大值,湖泊盐度下降,湖泊水位达到剖面时期古湖的最高水位,气候温湿。青海湖高湖面期出现在MIS 5早期<sup>[55]</sup>,SG剖面所在时期是大湖期晚期(MIS 5晚期—MIS 4早期),气候向冷干发展,湖泊面积逐渐萎缩,向河流和风成沉积方向演变。MIS 5a/MIS 4转换期是东亚季风演变的重要时期,是全球气候向末次全球变暖的重要时期。

## 4.2 末次冰期早冰阶 MIS 4 环境演变

MIS 4 阶段(80.1—70.1 ka), 对应于 SG1、SG2 层, 自底部向上  $\text{SiO}_2$  含量增加,  $\text{CaO}$  含量降低。Na/K、CIA、MgO 出现一个峰谷波动, Na/K 先增大后减小, CIA、MgO 为先降低后增大的态势。 $K_i$  值增大,  $w$  值逐渐减小。这表明 MIS 4 阶段风化作用较弱, 盐度升高, 湖泊水位下降, 气候整体冷干, 降水出现了由干向润的波动, 可细分为 2 个阶段(MIS 4 早期和 MIS 4 中期):

MIS 4 早期(80.1—74.9 ka): 剖面深度 218—70 cm, 对应于 SG2 层。 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、MgO 含量迅速降低,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、Na/K 值迅速增大, CIA 出现最低值。这揭示出 MIS 5a 向 MIS 4 转变期间气候发生剧变, 冬季风增强, 降水减少, 湖泊盐度升高, 湖面下降, 气候最冷干; 这与古里雅冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录中发现温度突然下降了  $12\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[56]</sup>、念青唐古拉山发育了小型山谷冰川<sup>[57]</sup>、黄土出现  $L_1$ — $S_1$  界面高度吻合, 故共和古湖末次冰期开始于 80 ka。MIS 4 阶段开始于 80 ka<sup>[41]</sup>, 这与青藏高原东北部多年冻土带扩展<sup>[58]</sup>、北源黄土的磁化率出现低值的记录一致<sup>[59]</sup>; 但也有研究发现末次冰期始 75 ka<sup>[60]</sup>, 在格陵兰 GRIP 冰芯记录中 MIS 5 阶段的结束时间为 75—80 ka<sup>[61]</sup>。这一结果反映出青藏高原末次间冰期向末次冰期转换时间较全球其他地区要早, 对全球气候变化反应更敏感, 是全球气候环境变化的启动机和放大器。

MIS 4 中期(74.9—70.1 ka): 剖面深度 70—0 cm, 对应于 SG1 层。 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、MgO 含量增加,  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、Na/K 值降低, CIA 出现小峰区。此阶段夏季风占主导, 降水 MIS 4 早期有所增加, 盐度降低, 湖泊水位上升, 气候凉润; 同期三门峡王官剖面与甘肃武威沙沟剖面<sup>[52]</sup>也捕捉到了一次暖性回返事件, 在古里雅冰芯<sup>[62]</sup>、青藏高原湖泊<sup>[63]</sup>记录中也都有该事件的痕迹。

MIS 4 阶段气候冷干, 同期共和盆地茫拉剖面形成风砂层<sup>[46]</sup>、青藏高原东北部合作盆地粒径较粗<sup>[47]</sup>、若尔盖古湖收缩<sup>[64]</sup>均佐证了此阶段气候冷干、成壤强度微弱, 环境信息具有一致性。

## 5 结论

对共和盆地 SG 剖面常量元素及其比值变化特征分析, 表明地化学元素及其比值对气候响应灵敏, 可用来重建 90—70 ka 共和盆地的环境演变

过程。

$\text{SiO}_2$ 、Na/K 值自剖面底部向上大致呈现出一谷两峰的变化特征, 整体呈波动增大趋势,  $\text{CaO}$ 、MgO、CIA 与之相反, 表明 90—70 ka 共和盆地气候整体向冷干方向发展。 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  对过渡性气候变化更灵敏, MgO 对全剖面气候突变反映灵敏。CIA 值和 CN-K-A 三角图表明剖面处于脱 Ca、Na 的初级风化阶段。Na/K、 $\text{Ca}/(\text{Fe}+\text{Ca})$ 、 $\text{Mg}/\text{Ca}$  揭示了湖相沉积剖面属于高盐度半咸水、碱性环境。以上述指标可将共和盆地 SG 剖面的沉积环境划分为 MIS 5 (91.5—80.1 ka)、MIS 4 (80.1—70.1 ka) 2 个主要阶段, 气候发生了湿润→凉干→湿润→温和偏干→温湿→冷干→凉润的演变过程, 共和古湖水位随气候变化产生波动。

共和盆地末次间冰期-末次冰期时期, 茫拉发育了风成砂-黄土剖面, 沙沟地区形成了沉积序列连续的湖泊沉积环境, 二者是横向异变、同期异相。研究区的气候演变趋势和全球气候变化趋势一致, 但因区域差异性, 共和盆地在 MIS 5 向 MIS 4 过渡时间比全球其他地区早 5 ka, 表明青藏高原共和盆地对全球气候变化更灵敏, 是全球气候变化的启动机和放大器, 可作为重建古气候环境的重要载体。

**致谢:** 感谢中国科学院西北生态环境资源研究院的张彩霞协助完成元素分析工作, 感谢中国科学院西北生态环境资源研究院公共技术服务中心提供样品测试服务。

## 参考文献:

- [1] Xu Y. Proceedings of International Symposium on the Qinghai-Xizang Plateau and Mountain Meteorology [C]. American Meteorological Society, 1986.
- [2] Chen F, Wu D, Chen J, et al. Holocene moisture and East Asian summer monsoon evolution in the northeastern Tibetan Plateau recorded by Lake Qinghai and its environs: a review of conflicting proxies [J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 154(15): 111-129.
- [3] Ding Z, Lu R, Lyu Z, et al. Geochemical characteristics of Holocene aeolian deposits east of Qinghai Lake, China, and their paleoclimatic implications [J]. The Science of the Total Environment, 2019, 692(20): 917-929.
- [4] Bing L, Jin H, Sun Z, et al. Evidence of Holocene millennial-scale climatic change from Gonghe Basin peat deposit, northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Arid Environments, 2014, 106: 1-10.
- [5] An F, Lai Z, Liu X J, et al. Abnormal Rb/Sr ratio in lacustrine



- sediments of Qaidam Basin, NE Qinghai-Tibetan Plateau: a significant role of aeolian dust input[J]. *Quaternary International*, 2018, 469: 44–57.
- [6] 陈发虎, 张家武, 程波, 等. 青海共和盆地达连海晚第四纪高湖面与末次冰消期以来的环境变化[J]. *第四纪研究*, 2012, 32(1): 122–131.
- [7] Qiang M. Late Pleistocene and Holocene aeolian sedimentation in Gonghe Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau: variability, processes, and climatic implications[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 132(15): 57–73.
- [8] Li G, Zhang H, Liu X, et al. Paleoclimatic changes and modulation of East Asian summer monsoon by high-latitude forcing over the last 130,000 years as revealed by independently dated loess-paleosol sequences on the NE Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 237(1): 106283.
- [9] 张玉柱, 黄春长, 庞奖励, 等. 黄河上游官亭盆地喇家遗址地层光释光测年研究[J]. *地理学报*, 2013, 68(5): 626–639.
- [10] Fang X, Fang Y, Zan J, et al. Cenozoic magnetostratigraphy of the Xining Basin, NE Tibetan Plateau, and its constraints on paleontological, sedimentological and tectonomorphological evolution[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 190: 460–485.
- [11] Lu H Y, Wang X, Wang X, et al. Palaeoclimatic changes in northeastern Qinghai-Tibetan Plateau revealed by magnetostratigraphy and magnetic susceptibility analysis of thick loess deposits[J]. *Quaternary International*, 2012, 279–280(16): 293.
- [12] 孙庆峰, 程波, 赵黎. 共和盆地黏土矿物与孢粉记录的末次冰消期以来的气候环境相位差[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(5): 1237–1247.
- [13] 胡彬, 张春霞, 吴海斌, 等. 西宁盆地始新世河湖相沉积序列黏土矿物组合特征及其古环境意义[J]. *中国科学D辑*, 2019, 49(3): 569–583.
- [14] 胡梦珩, 李娜娜, 张亚云, 等. 近32 ka以来青海湖古风成砂-古土壤序列色度参数变化特征及环境演变[J]. *第四纪研究*, 2020, 40(5): 1105–1117.
- [15] 方小敏, 戴雪荣, 李吉均, 等. 亚洲季风演化的突发性与不稳定性: 以末次间冰期土壤发生为例[J]. *中国科学D辑*, 1996, 26(2): 154–160.
- [16] 管清玉, 潘保田, 高红山, 等. 高分辨率黄土剖面记录的末次间冰期东亚季风的不稳定性特征[J]. *中国科学D辑*, 2007, 37(1): 86–93.
- [17] Mpa B, Sl C, Jrma D, et al. Initial Mediterranean response to major climate reorganization during the last interglacial-glacial transition[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 215: 232–241.
- [18] 程波, 陈发虎, 张家武. 共和盆地末次冰消期以来的植被和环境演变[J]. *地理学报*, 2010, 65(11): 1336–1344.
- [19] Jin Z, Yu J, Zhang F, et al. Glacial-interglacial variation in catchment weathering and erosion paces the Indian summer monsoon during the Pleistocene[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 248: 106619.
- [20] 徐叔鹰, 徐德馥, 石生仁. 共和盆地地貌发育与环境演化探讨[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 1984, 20(1): 146–157.
- [21] 董光荣, 高尚玉, 金炯, 等. 青海共和盆地土地沙漠化及其防治[J]. *中国沙漠*, 1989, 9(1): 64–78.
- [22] 田少华, 肖国桥, 戴高文, 等. 青海共和盆地早全新世古风向重建及其对黄土物源的指示[J]. *第四纪研究*, 2020, 40(1): 95–104.
- [23] 朱雅娟, 李虹, 赵淑伶, 等. 共和盆地不同类型防护林的改善小气候效应[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 841–848.
- [24] 吉云平, 杨振京, 赵华, 等. 河北阳原盆地井儿洼剖面常量元素地球化学特征揭示的中更新世晚期以来气候变化[J]. *古地理学报*, 2016, 18(3): 487–496.
- [25] 李徐生, 韩志勇, 杨守业, 等. 镇江下蜀剖面的化学风化强度与元素迁移特征[J]. *地理学报*, 2007, 62(11): 1174–1184.
- [26] 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. *地学前缘*, 2003(4): 539–544.
- [27] Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. *Sand and Sandstone*[M]. Berlin, Germany: Springer, 1972.
- [28] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715–717.
- [29] 陈敬安, 万国江, 陈振楼, 等. 洱海沉积物化学元素与古气候演化[J]. *地球化学*, 1999, 28(6): 562–570.
- [30] 李徐生, 韩志勇, 杨达源, 等. 镇江下蜀黄土的稀土元素地球化学特征研究[J]. *土壤学报*, 2006, 43(1): 1–7.
- [31] Das O, Wang Y, Donoghue J, et al. Reconstruction of paleosols and paleoenvironment using geochemical proxies archived in the sediments of two coastal lakes in northwest Florida[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 68(3): 142–153.
- [32] 郭超, 蒙红卫, 马玉贞, 等. 藏南羊卓雍错沉积物元素地球化学记录的过去2000年环境变化[J]. *地理学报*, 2019, 74(7): 1345–1362.
- [33] 宋春晖, 鲁新川, 邢强, 等. 临夏盆地晚新生代沉积物元素特征与古气候变迁[J]. *沉积学报*, 2007, 25(3): 409–416.
- [34] 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): 3–5.
- [35] 陈渭南, 高尚玉, 孙忠. 毛乌素沙地全新世地层化学元素特点及其古气候意义[J]. *中国沙漠*, 1994, 14(1): 22–30.
- [36] 文华国, 郑荣才, 唐飞, 等. 鄂尔多斯盆地耿湾地区长6段古盐度恢复与古环境分析[J]. *矿物岩石*, 2008, 28(1): 114–120.
- [37] Nesbitt H W, Young G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(7): 1523–1534.
- [38] 赵俊青, 夏斌, 纪友亮, 等. 湖相碳酸盐岩高精度层序地层学探析[J]. *沉积学报*, 2005, 23(4): 646–656.
- [39] 王子玉, 姚琬圭, 陈晓明. 沉积磷酸盐法的古盐度意义[J]. *沉积学报*, 1989, 7(4): 113–119.
- [40] 邓宏文, 钱凯. *沉积地球化学与环境分析*[M]. 甘肃: 科学技术出版社, 1993.
- [41] 安芷生, Porter S C, Chappell J, 等. 最近130 ka洛川黄土堆积序列与格陵兰冰芯记录[J]. *科学通报*, 1994, 39(24): 2254–2256.

- [42] 张涛涛,李廷勇,韩立银,等. MIS 5a/5b时期亚洲夏季风变化的高分辨率石笋记录[J]. 中国岩溶, 2017, 36(2): 162-170.
- [43] 范小露,田明中,刘斯文. 巴丹吉林沙漠东南部末次间冰期环境演变:来自粒度、光释光(OSL)及<sup>14</sup>C测年的证据[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 892-900.
- [44] 管东红,奚晓霞,郝永萍,等. 北塬剖面碳酸钙记录的末次间冰期气候不稳定性[J]. 冰川冻土, 1996, 18(2): 25-30.
- [45] Baumann K H, Lackschewitz K S, Mangerud J, et al. Reflection of Scandinavian Ice Sheet Fluctuations in Norwegian Sea sediments during the past 150, 000 years[J]. Quaternary Research, 1995, 43(2): 185-197.
- [46] 冯淑琴. 基于茫拉剖面的共和盆地 86.5 ka 以来的气候变化与成壤环境重建[D]. 兰州: 西北师范大学, 2018.
- [47] 吕连清,方小敏,鹿化煜,等. 青藏高原东北缘黄土粒度记录的末次冰期千年尺度气候变化[J]. 科学通报, 2004, 49(11): 1091-1098.
- [48] 王丽媛,辛蔚,程捷. 腾格里沙漠西北缘青土湖晚第四纪孢粉组合特征与环境变迁[J]. 古地理学报, 2014, 16(2): 239-248.
- [49] 李吉均. 中国西北地区晚更新世以来环境变迁模式[J]. 第四纪研究, 1990, 10(3): 197-204.
- [50] 雒聪文,马玉贞,王凯,等. 东亚地区 MIS 5 时期孢粉记录的植被与气候研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(5): 540-551.
- [51] Lehman S J, Sachs J P, Crotwell A M, et al. Relation of subtropical Atlantic temperature, high-latitude ice rafting, deep water formation, and European climate 130, 000-60, 000 years ago[J]. Quaternary Science Reviews, 2002, 21(18/19): 1917-1924.
- [52] 管清玉,潘保田,高红山,等. 三门峡王官与武威沙沟黄土记录中的末次间冰期向末次冰期转换期的暖性回返事件[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2005, 41(4): 1-5.
- [53] North Greenland Ice Core Project Members. High-resolution record of northern hemisphere climate extending into the last interglacial period[J]. Nature, 2004, 431(7005): 147-151.
- [54] Zhang S, Zhang J, Zhao H, et al. Spatiotemporal complexity of the "Greatest Lake Period" in the Tibetan Plateau[J]. Science Bulletin, 2020, 65(16): 1317-1319.
- [55] Liu X J, Lai Z P, Fan Q S, et al. Timing for high lake levels of Qinghai Lake in the Qinghai-Tibetan Plateau since the Last Interglaciation based on quartz OSL dating[J]. Quaternary Geochronology, 2010, 5(2/3): 218-222.
- [56] 王有清,姚檀栋. 冰芯记录中末次间冰期-冰期旋回气候突变事件的研究进展[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 550-558.
- [57] 赵希涛,朱大岗,严富华,等. 西藏纳木错末次间冰期以来的气候变迁与湖面变化[J]. 第四纪研究, 2003, 23(1): 41-52.
- [58] 潘保田,陈发虎. 青藏高原东北部 15 万年来的多年冻土演化[J]. 冰川冻土, 1997, 19(2): 30-38.
- [59] 李吉均,朱俊杰,康建成,等. 末次冰期旋回兰州黄土剖面与南极东方站冰岩芯的对比[J]. 中国科学(B辑), 1990(10): 1086-1094.
- [60] 赵井东,施雅风,王杰. 中国第四纪冰川演化序列与 MIS 对比研究的新进展[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 867-884.
- [61] Forzoni, Andrea, Reimann, et al. Non-linear response of the Golo River system, Corsica, France, to Late Quaternary climatic and sea level variations[J]. Quaternary Science Reviews, 2015, 121(1): 11-27.
- [62] Thompson L G, Yao T, Davis M E, et al. Tropical climate instability: the Last Glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core[J]. Science, 1997, 276(5320): 1821-1825.
- [63] 张平中,王先彬,王苏民,等. 青藏高原东部末次间冰期气候不稳定性分析[J]. 科学通报, 1998, 43(1): 17-21.
- [64] 薛滨,王苏民,吴敬禄,等. 青藏高原东北部末次间冰期以来的古气候:以若尔盖盆地 RM 孔分析为例[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(3): 327-332.

## Geochemical characteristics of major element oxides and environmental evolution inferred from lacustrine sediments in Gonghe Basin, China during the early Late Pleistocene

Hu Mengjun, Zheng Dengyou, Ji Tianqi, Zhuang Jing, Sun Wenli

(College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** By analyzing the characteristics of major element oxides and their ratios in the sediment of the Shagou section in the Gonghe Basin, combined with the photoluminescence dating, we studied the environmental evolution of the early Late Pleistocene in Gonghe Basin. The results show that: (1) From the bottom to the top of the section, the  $\text{SiO}_2$  content and Na/K ratio generally show the characteristic of "one valley and two peaks", with an overall increasing trend. The high values all appear in the fine sand layer, indicating a cold and dry climate. The low values appear in the silt layer, indicating a warm and humid climate. (2) From the bottom to the top of the section, the CaO, MgO contents, and CIA ratio generally show a change characteristic of "one peak and two valleys", with an overall decreasing trend. The high values all appear in the silt layer, indicating a warm and humid climate. The low values appear in the fine sand layer, indicating a cold and dry climate. (3) The climate of the Gonghe Basin has three obvious cool/dry-warm/humid fluctuations between 90–70 ka. Those fluctuations are divided into three stages. MIS 5b (91.5–89.4 ka) stage is the low water level period of the ancient Gonghe Lake that the climate develops from warm to cool-dry; MIS 5a (89.4–80.1 ka) stage is the high water level period of lakes with warm and humid climate; and MIS 4 (80.1–70.1 ka) stage is the shrinking period of lakes with cold and dry lakes.

**Key words:** Gonghe Basin; major element oxides; lacustrine sediment; environmental evolution