

# 古尔班通古特沙漠沙质沉积物矿物成熟度 特征及其区域差异\*

李璇, 杨静, 张峰<sup>†</sup>

(新疆大学 地理与遥感科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 矿物成熟度能够很好地反映碎屑沉积物的组成状态, 与物源、化学风化、搬运沉积以及气候等因素有关, 因而在沙漠研究中成为重要的常量元素地球化学指标. 采集古尔班通古特沙漠22个沙丘顶部沙样并对其常量元素进行测量, 在此基础上利用Pettijohn提出的方法对沉积物矿物成熟度进行计算, 系统分析沙漠沉积物的矿物成熟度特征. 研究发现: 古尔班通古特沙漠沙质沉积物存在明显的区域分布差异, 呈现出从沙漠边缘向沙漠腹地递增的空间分布趋势. 物源、搬运沉积和分选过程、植被以及化学风化等因素是导致其产生区域分布差异的原因.

**关键词:** 沙漠; 矿物成熟度; 常量元素; 物源

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2023.04.24.0002

**中图分类号:** P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2024)01-0101-09

**引文格式:** 李璇, 杨静, 张峰. 古尔班通古特沙漠沙质沉积物矿物成熟度特征及其区域差异[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2024, 41(1): 101-109.

**英文引文格式:** LI Xuan, YANG Jing, ZHANG Feng. Mineralogical maturity characteristics of sandy sediments in Gurbantunggut Desert and their regional differences[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2024, 41(1): 101-109.

## Mineralogical Maturity Characteristics of Sandy Sediments in Gurbantunggut Desert and Their Regional Differences

LI Xuan, YANG Jing, ZHANG Feng

(School of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China)

**Abstract:** Mineralogical maturity can well reflect the composition of clastic sediments, which is related to provenance, chemical weathering, transported sediments and climate. Therefore, it has become an essential geochemical index of major elements in desert research. In this study, sand samples were collected from 22 dune tops in the Gurbantunggut Desert and their major elements were measured. On this basis, the mineralogical maturity of the sediment was calculated using the method proposed by Pettijohn, and the mineralogical maturity characteristics of the desert sediment were systematically analyzed. It was found that the sandy sediments in the Gurbantunggut Desert had obvious zonal and distributional differences, showing an increasing spatial distribution trend from the desert edge to the desert hinterland. Factors such as physical sources, transport deposition and sorting processes, vegetation, and chemical weathering are responsible for the regional distribution differences.

**Key words:** deserts; mineralogical maturity; major elements; provenance

## 0 引言

沙漠是在干燥气候和丰富沙源等自然地理条件下经过长期发展演变形成的<sup>[1]</sup>. 沙漠和半沙漠占据了全球陆地表面的三分之一以上<sup>[2-3]</sup>, 沙漠沉积物地球化学特征是沙漠研究的主要方向, 分析沙漠元素矿物等地球化学特征, 有助于分析沉积物的物质来源<sup>[4-8]</sup>, 了解其沉积与演化过程<sup>[9-11]</sup>以及揭示风尘记录的古环境信息<sup>[12-13]</sup>. 用常量元素计算的矿物成熟度可以用来描述沙漠沉积物的地球化学特征. 矿物成熟度已经被沉积岩学家和沉积学家广泛使用<sup>[14-20]</sup>, 成为确定沉积物来源、运输和风化历史的有力工具<sup>[21-22]</sup>.

\* 收稿日期: 2023-04-24

基金项目: 国家自然科学基金“全新世中后期克里雅河尾间绿洲演化序列的建立”(U1503381).

作者简介: 李璇(1998—), 女, 硕士生, 从事自然地理与资源环境的研究, E-mail: 1072415744@qq.com.

<sup>†</sup> 通讯作者: 张峰(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事干旱区环境演化的研究, E-mail: zhang-f-eng@sohu.com.

矿物成熟度是指碎屑沉积体的组成状态,与富含石英的抗性矿物的浓度有关<sup>[23]</sup>. Pettijohn等将这种成熟状态描述为“所有沙子中结构和成分最成熟的,一些接近沙子演化的理论终点”<sup>[24]</sup>. 矿物成熟度可以用地球化学方法进行说明. Pettijohn等提出了一种描述矿物成熟度的方法,即绘制 $\text{Log}(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ (斜长石与钾长石的量度) vs.  $\text{Log}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ (石英与总长石的量度)图,较成熟的砂岩具有较高的 $\text{Log}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和较低的 $\text{Log}(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ 值<sup>[24]</sup>. Herron在上述基础上,将 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ 替代 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 作为矿物稳定性的指标,用 $\text{Log}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$  vs.  $\text{Log}(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ 图描述沉积物的矿物成熟度,该方法有利于区分各种砂岩中的岩屑碎片和长石,可以用于更细或者更粗粒的沉积物<sup>[25]</sup>. 另一种方法是Suttner等提出的用 $\text{SiO}_2$  vs.  $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}+\text{Al}_2\text{O}_3)$ 图来描述矿物成熟度,矿物成熟度较高的沉积物具有较高的 $\text{SiO}_2$ 和较低的 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}+\text{Al}_2\text{O}_3)$ 含量<sup>[20]</sup>.

近年来,学者们对于沙漠沉积物矿物成熟度特征展开了一定的研究<sup>[6,23,26-28]</sup>. 根据前人研究,有几种可能的机制会导致沉积物矿物成熟度增加:1)母岩沉积物中富含石英,从已经成熟的源沉积物中继承而来<sup>[27]</sup>;2)在有利的条件下,化学风化引起土壤中长石和岩屑颗粒丰度的降低<sup>[15-16,19,29]</sup>;3)沙丘搬运沉积过程中,长石受到磨损和冲击导致尺寸减少<sup>[30-31]</sup>. 目前,学者们关于沉积物矿物成熟度集中研究物源对于矿物成熟度的影响,其它影响因素(如气候、搬运沉积过程等)研究较少.

古尔班通古特沙漠是中国固定/半固定沙丘分布面积最广的沙漠<sup>[32]</sup>,该沙漠沙质沉积物物质来源具有多源性<sup>[1,33-34]</sup>,沙质沉积物地球化学特征等方面存在着明显的区域差异<sup>[6]</sup>. 因此,本文采集了古尔班通古特沙漠22个沙质沉积物样品,测定其常量元素特征,并根据Pettijohn等提出的 $\text{Log}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$  vs.  $\text{Log}(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ 图<sup>[24]</sup>对沙漠沉积物矿物成熟度进行分析. 基于本文的研究数据与前人的研究成果,探讨了以下问题:1)古尔班通古特沙漠沙质沉积物常量元素与矿物成熟度区域分布特征;2)影响古尔班通古特沙漠沙质沉积物矿物成熟度产生区域差异的主要原因.

## 1 研究区与方法

### 1.1 研究区概况

古尔班通古特沙漠主要位于准噶尔盆地腹地( $44^\circ 11' \sim 46^\circ 20' \text{ N}$ ,  $84^\circ 31' \sim 90^\circ 00' \text{ E}$ ),面积约为 $4.88 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是我国第二大沙漠<sup>[1,35]</sup>. 其形成与演化主要受到特提斯洋和古亚洲洋等构造单元动力作用影响,在众多地块的不断组合以及多次构造变形作用下演化而成<sup>[36]</sup>. 准噶尔盆地内部第三系地层分布较为广泛,其沉积厚度可达300~500 m,主要以砂岩、泥岩等岩性互层为主<sup>[37]</sup>. 沙漠的固定/半固定沙丘面积约占整个面积的97%<sup>[1]</sup>,整体来看沙丘类型复杂,主要包括半固定的蜂窝状沙丘和树枝状沙丘、固定的纵向沙垄、流动新月形沙丘链、梁窝状沙丘、抛物线沙丘以及金字塔沙丘等<sup>[6]</sup>. 沙漠主要分布两大水系:一是发源于天山北麓的南缘水系,二是发源于阿尔泰山南麓的北缘水系<sup>[38]</sup>,主要包括额尔齐斯河、乌伦古河等<sup>[6]</sup>. 该沙漠属温带干旱-半干旱气候<sup>[39]</sup>,年平均气温为 $5.09 \sim 9.05 \text{ }^\circ\text{C}$ ;年平均降水为 $132.84 \sim 214.46 \text{ mm}$ <sup>[6]</sup>,主要集中在5~9月,从盆地边缘向中部减少<sup>[40]</sup>;年蒸发量高达 $2\ 000 \sim 2\ 800 \text{ mm}$ <sup>[41]</sup>. 古尔班通古特沙漠植被生长状况良好<sup>[1]</sup>,植物群落中白梭梭为优势种,占据沙丘中下部;蛇麻黄群落主要分布在沙丘中下部和丘间低地,其下普遍存在短命植物和一层黑色的苔藓、地衣及藻类<sup>[38,42]</sup>.

### 1.2 材料与方法

在古尔班通古特沙漠进行了广泛的实地调查,使用套筒法在不同沙丘顶部(0~10 cm)采集22个样品(图1). 前人研究表明,古尔班通古特沙漠沙质沉积物主要以细粒为主( $125 \sim 250 \text{ }\mu\text{m}$ )<sup>[40,43-44]</sup>,故在新疆大学地理与遥感科学学院土壤实验室将样品过筛收集 $125 \sim 250 \text{ }\mu\text{m}$ 组分,然后在刚玉研钵中将样品研磨至 $75 \text{ }\mu\text{m}$ 以下,过200目标准筛,在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中干燥5 h.

常量元素测试在中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪国家重点实验室完成,遵循Tursun等<sup>[6]</sup>的实验流程进行. 称取0.6 g粉末状样品和6 g无水四硼酸锂( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ),倒入铂金坩埚中搅拌均匀,再加入2滴溴化锂(LiBr)溶液作为脱模剂. 将装有样品的坩埚置于熔样机中 $1\ 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 融化约19 min,将熔好的液体倒入铂金坩埚模具,待样品自动成形并冷却至室温后,使用X射线荧光光谱仪Axios advanced PW4400型(荷兰产)进行测试. 为了控制测试精度,采用重复样品(20个)和国家标准物质(GSW)与样品同时测试的方法,测试相对误差控制在5%之内.

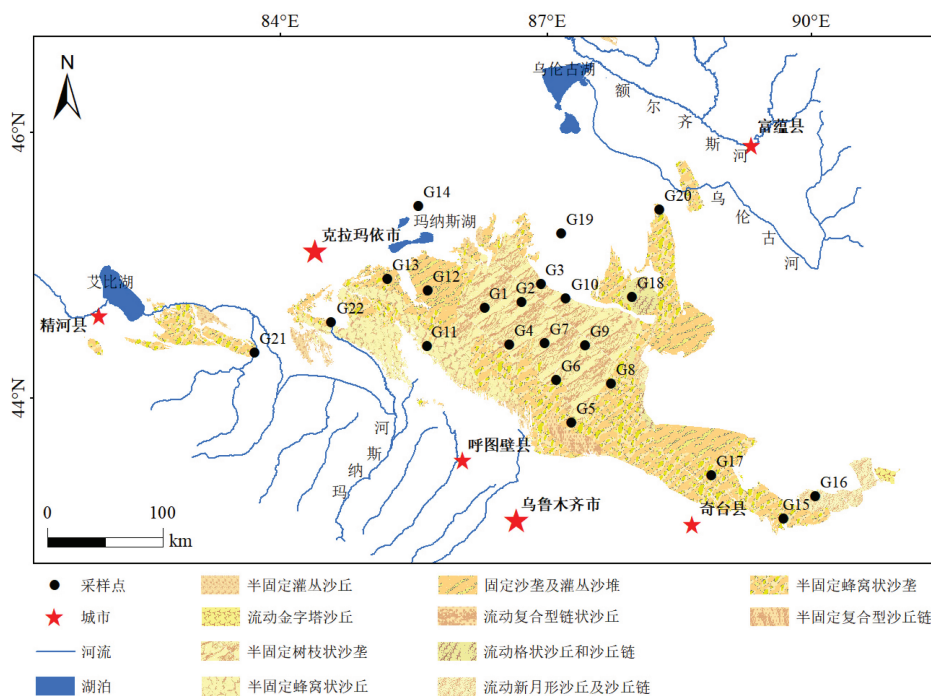


图1 古尔班通古特沙漠采样点分布

矿物成熟度通过Pettijohn等提出的 $\text{Log}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$  vs.  $\text{Log}(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ 的对比图来说明,该方法的优点在于提供了长石与石英的无量纲比较,消除了碳酸盐岩的影响.较成熟的砂岩具有较高的 $\text{Log}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和较低的 $\text{Log}(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ 值<sup>[24]</sup>.

1982年, Nesbitt等提出化学蚀变指数(CIA)用以衡量沉积物所受风化程度,其能定量有效地判定沉积物所遭受到的化学风化程度以及沉积物沉积时周围可能的气候环境<sup>[45]</sup>.其计算方法为:

$$\text{CIA} = \text{mol.} \left( \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}} \right) \times 100 \quad (1)$$

式中:各元素含量采用摩尔质量(mol)进行计算;CaO\*为硅酸盐岩组分中的Ca元素含量,但是在碳酸盐岩(方解石、白云石)和磷酸盐岩(磷灰石)中也含有Ca,需要对其去除校正,主要根据Honda等提出的方法进行<sup>[46]</sup>:

$$\text{CaO}^* = 0.35 \times \frac{2(\text{Na}_2\text{O})}{62} \quad (2)$$

## 2 实验结果

### 2.1 沙质沉积物常量元素特征

主要测试的常量元素为 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 以及 $\text{K}_2\text{O}$ .在沙质沉积物中,含量最高的是 $\text{SiO}_2$ ,其次是 $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{Na}_2\text{O}$ 和 $\text{K}_2\text{O}$ 含量较低.古尔班通古特沙漠沙质沉积物中 $\text{SiO}_2$ 含量变化范围大致为58.75%~83.24%,平均含量为73.65%; $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量变化范围大致为7.23%~13.06%,平均含量为10.17%; $\text{Na}_2\text{O}$ 含量变化范围大致为1.06%~4.25%,平均含量为2.27%; $\text{K}_2\text{O}$ 含量变化范围大致为1.90%~3.98%,平均含量为2.47%(表1).

研究发现古尔班通古特沙漠沙质沉积物的 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 以及 $\text{K}_2\text{O}$ 这4个常量元素存在明显的区域分布差异.沙漠腹地沉积物中的 $\text{SiO}_2$ 含量较高,沙质沉积物中的 $\text{SiO}_2$ 含量从沙漠腹地向沙漠东西边缘两侧呈现出逐渐减少的空间变化趋势,沙漠东西边缘沉积物中的 $\text{SiO}_2$ 含量最低(图2(a)); $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量空间变化趋势与 $\text{SiO}_2$ 含量完全相反,呈现出从沙漠边缘向沙漠腹地逐渐减少的空间变化趋势,沙漠腹地沙质沉积物中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量整体较低,沙漠东西边缘沉积物的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量整体较高(图2(b)); $\text{Na}_2\text{O}$ 含量与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量空间变化趋势较为一致,呈现出从沙漠腹地向沙漠东西边缘逐渐增加的空间变化趋势(图2(c)); $\text{K}_2\text{O}$ 含量空间分布与其它3种元素具有明显区别,沙漠腹地、沙漠北部边缘以及沙漠西部等区域沙质沉积物中的 $\text{K}_2\text{O}$ 含量较高,沙漠东部地区沙质沉积物中的 $\text{K}_2\text{O}$ 含量较低,故古尔班通古特沙漠沙质沉积物中的 $\text{K}_2\text{O}$ 含量整体呈现出从西向东递减的空间变化趋势(图2(d)).

表 1 古尔班通古特沙漠沙质沉积物常量元素含量统计 (wt/%)

样品编号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
G1	78.33	8.55	1.60	2.79
G2	75.89	9.82	1.50	3.98
G3	80.14	7.23	1.06	2.82
G4	83.24	7.23	1.20	2.69
G5	79.15	10.61	2.41	2.13
G6	78.23	9.96	2.15	2.30
G7	78.25	8.49	1.60	2.48
G8	78.19	10.30	2.35	2.05
G9	76.91	9.42	2.02	2.23
G10	80.79	8.24	1.43	2.54
G11	70.04	10.97	2.43	2.35
G12	69.33	10.96	2.63	2.66
G13	70.87	10.41	2.38	2.43
G14	58.75	10.99	4.25	2.32
G15	64.08	12.66	3.16	1.93
G16	66.91	13.06	3.47	1.90
G17	67.41	11.88	3.03	2.17
G18	76.72	9.46	2.06	2.14
G19	73.88	9.81	1.38	3.01
G20	74.47	10.55	2.42	2.08
G21	68.71	12.27	2.87	2.86
G22	70.07	10.80	2.46	2.43
平均值	73.65	10.17	2.27	2.47

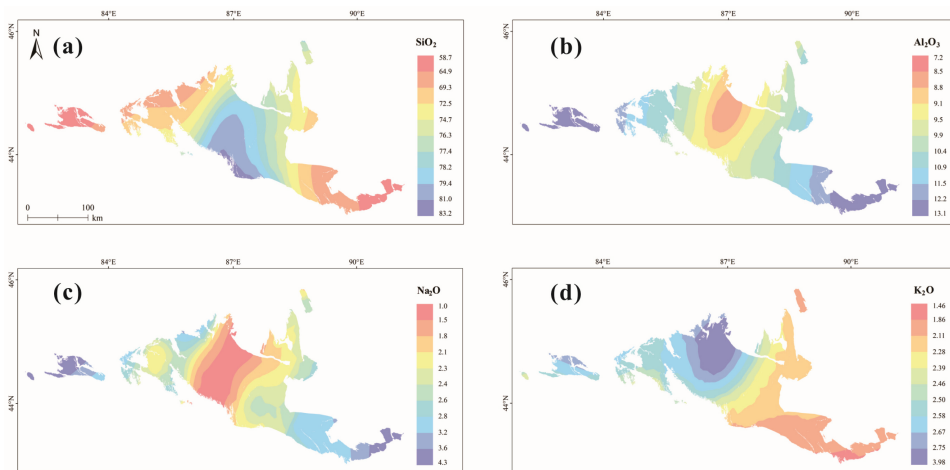


图 2 古尔班通古特沙漠沙质沉积物元素空间分布

## 2.2 沙质沉积物矿物成熟度特征

根据图3(a)的样品分布,矿物成熟度相近的样品其地理位置也较为集中,可将古尔班通古特沙漠划分为3个区域,沙质沉积物矿物成熟度具有明显的区域分布差异,沙质沉积物矿物成熟度由小到大为:Ⅰ区<Ⅱ区<Ⅲ区(图3)。Ⅰ区主要位于沙漠边缘,主要包括G14、G15、G16、G17以及G21等样品(图3(a));该区沉积物样品的 $\text{Log}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 值分布范围大致为0.70~0.75,其 $\text{Log}(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ 值大致分布范围为0.001~0.260,其矿物成熟度与其它区域相比较低(图3(b))。Ⅱ区主要位于山前-腹地的过渡地带,主要包括G5、G6、G8、G9、G11、G12、G13、G18、G20、G22等样品(图3(a));该区沙质沉积物的 $\text{Log}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 值分布范围为0.80~0.91,其 $\text{Log}(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ 值分布范围为-0.04~0.06,整体来看,Ⅱ区沉积物样品的 $\text{Log}(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ 值分布范围与Ⅰ区相差

不大,但其 $\text{Log}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 值整体高于I区,所以其矿物成熟度整体较高于I区(图3(b)). III区主要位于沙漠腹地,主要包括G1、G2、G3、G4、G7、G10、G19等样品(图3(a));该区沉积物样品的 $\text{Log}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 值分布范围为0.88~1.06,其 $\text{Log}(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ 值分布范围为-0.43~-0.19. III区沙质沉积物的 $\text{Log}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 值分布较为分散,与II区值的分布较为相似,但是该区沙质沉积物的 $\text{Log}(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ 值分布明显小于其它两个区域(图3(b)),整体来看,III区沙质沉积物矿物成熟度相比其它两个区域高. 综上,古尔班通古特沙漠沙质沉积物矿物成熟度区域分布差异较为明显,整体上呈现出从沙漠边缘向沙漠腹地递增的空间变化趋势.

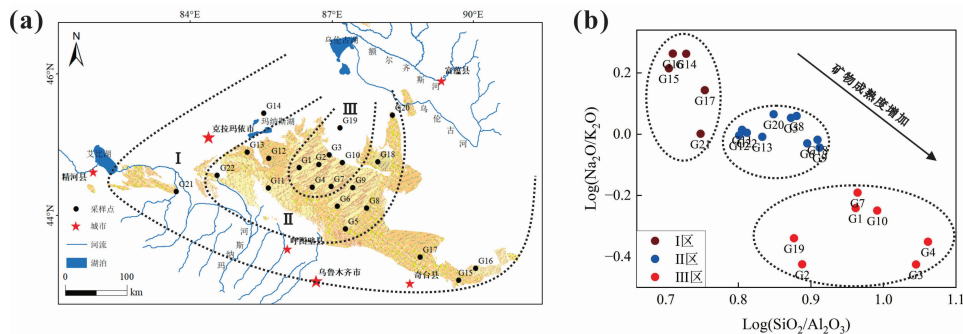


图3 古尔班通古特沙漠沙质沉积物矿物成熟度分区图

### 3 分析与讨论

根据前人研究成果以及古尔班通古特沙漠地质构造背景,综合讨论物源、风力搬运沉积和分选过程、植被以及化学风化等因素对于古尔班通古特沙漠沙质沉积物矿物成熟度区域分布差异的影响.

#### 3.1 物源

古尔班通古特沙漠是准噶尔盆地各山脉风化剥蚀碎屑物质的沉积汇,周围不同山脉的风化剥蚀产物、下伏沉积物均会为沙丘的形成提供物源<sup>[1,33,47]</sup>. 周边山脉基岩组成不同,必然会引起源区以及沉积区沙质沉积物地球化学组成的差异. 准噶尔盆地南缘的沙漠沉积物主要来源于天山碎屑物质经冰川磨损及寒冻分化等作用形成粉砂粒级的物质<sup>[34]</sup>. 准噶尔西部的湖积平原是古尔班通古特沙漠西部沙漠沉积物的重要风沙物源<sup>[1]</sup>. 河流流向受到地势的控制,准噶尔盆地地势东北和南缘高、西南低,源自天山和准噶尔西部山地的河流将周边山脉风化剥蚀的碎屑物质带入沙漠腹地<sup>[1,48]</sup>. 玛纳斯河是天山北坡终端年径流量最大的河流,目前仅由玛纳斯河汇入古尔班通古特沙漠西南角的多年平均输沙量达到 $10^6 \text{ t}$ <sup>[48]</sup>. 此外,盛行西风和西北风以及蒙古西伯利亚高压形成的东北风也应该不可避免地向沙漠腹地输送了盆地西部和北部的沙物质<sup>[49-50]</sup>. 物质来源,特别是源区丰富石英矿物的存在会导致沉积物的矿物成熟度增加<sup>[27]</sup>,综上所述,古尔班通古特沙漠不同区域物质来源具有多样性,物源的不同必然导致古尔班通古特沙漠各个区域矿物成熟度产生一定的差异.

#### 3.2 风力搬运沉积和分选过程

一些不稳定矿物在搬运、沉积过程中容易受到物理和化学风化的影响发生破碎、磨损和风化而富集在沉积物较细的粒度组分中<sup>[11,16,51]</sup>. 分选则可以将沉积物中的细粒风化产物与粗粒组分分离,从而强烈地影响元素的丰度、变异性以及沉积作用<sup>[52-54]</sup>.

由于沙漠腹地远离周边山脉和河流等沙漠沉积物的潜在物源区<sup>[1]</sup>,沙漠腹地沙质沉积物可能经历了较长时间的搬运. 这一过程中,石英等矿物由于性质较为稳定不易被机械作用(破碎、磨损、分选)风化而得以留存在与原先大小较为一致的粗粒度组分中,而铁镁质矿物则因稳定性较差,经过破碎和分化而导致颗粒变细<sup>[11,51]</sup>. 古尔班通古特沙漠长期盛行的西北风和东北风会对沙漠沙进行分选,导致沙漠腹地沉积物中的细粒组分被风蚀,原地留下石英等较为稳定且较粗的沙质沉积物,从而使得沙漠腹地沉积物矿物成熟度高于其它区域.

#### 3.3 植被

古尔班通古特沙漠植被通过制约沙漠沉积物的搬运和分选,从而影响沙漠沙质沉积物矿物成熟度的空间差异<sup>[55-56]</sup>. 研究区风沙活动强盛期在4~6月,输沙势占据全年的60%以上,这恰好与其冬季积雪融化、高植被覆盖率同期<sup>[57]</sup>,地表风速很低<sup>[58]</sup>,加之沙丘被地衣、藻类以及苔藓所形成的生物结皮固定,限制了沙质沉积物的风成传输和沙质有效性<sup>[59]</sup>. 此外,虽然植被的存在可以有效抑制风蚀、减少沙面活动,但其作用主要取决于盖

度<sup>[60-62]</sup>。由于水分、热量条件、地貌形态等气候环境因子的影响,古尔班通古特沙漠不同区域的植被覆盖度具有一定的差异<sup>[42]</sup>,这无疑会对沙质沉积物矿物成熟度分异产生一定的影响。

古尔班通古特沙漠植被覆盖度较高的区域集中分布在沙漠西部<sup>[42]</sup>,沙漠腹地植被覆盖率相对较低<sup>[41]</sup>。一般情况下,植被覆盖率较高的地方不利于沙物质沿着主风向进行长距离的搬运和良好的分选,在只考虑植被的影响下,植被覆盖度越高会导致矿物成熟度越低。因此,沙漠腹地较低的植被覆盖无疑会导致该区域沙质沉积物矿物成熟度较高。

### 3.4 化学风化

化学风化会引起土壤中长石和岩屑颗粒丰度的降低<sup>[15,19,29]</sup>,造成石英相对富集<sup>[28]</sup>,从而导致沉积物矿物成熟度的增加<sup>[27]</sup>。

古尔班通古特沙漠各区域的CIA值变化范围大致为43.29~57.98(图4),各区域沙质沉积物的CIA存在着一定的区别,CIA平均值由小到大分别为:I区(平均值50.88)<II区(平均值53.51)<III区(平均值54.59)。因此,古尔班通古特沙漠各区域存在着不同的化学风化强度,进而导致沙漠各区域沉积物矿物成熟度的分异,沙漠腹地化学风化程度较强,该区长石和岩屑颗粒丰度降低,造成石英相对富集,导致沙漠沉积物矿物成熟度增加,高于其它区域。

## 4 结论

对22个沙质沉积物样品常量元素进行测试后发现,古尔班通古特沙漠沙质沉积物矿物成熟度存在明显的区域分布差异,整体上呈现出从沙漠边缘向沙漠腹地递增的空间变化趋势。物源、风力搬运沉积和分选过程、植被以及化学风化等因素均对古尔班通古特沙漠沙质沉积物矿物成熟度区域分异产生一定的影响。

### 参考文献:

- [1] 朱震达,吴正. 中国沙漠概论[M]. 2版. 北京:科学出版社,1980.  
ZHU Z D, WU Z. Introduction to Chinese deserts[M]. 2nd edition. Beijing: Science Press, 1980. (in Chinese)
- [2] LAITY P J J. Deserts and desert environments[M]. New York: BlackwellPub, 2008.
- [3] REYNOLDS J F, SMITH D M S, LAMBIN E F, et al. Global desertification: Building a science for dryland development[J]. Science, 2007, 316(5826): 847-851.
- [4] CHEN X L, SONG Y G, LI Y, et al. Provenance of sub-aerial surface sediments in the Tarim Basin, Western China[J]. CATENA, 2021, 198: 105014.
- [5] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: Its composition and evolution[J]. The Journal of Geology, 1985, 94(4): 57-72.
- [6] TURSUN D, ZHANG F, WU F, et al. Geochemical characterization of major elements in Gurbantunggut Desert sediments, north-western China and their regional variations[J]. Aeolian Research, 2022, 57: 100802.
- [7] YANG X P, ZHU B Q, WHITE P D. Provenance of aeolian sediment in the Taklamakan Desert of western China, inferred from REE and major-elemental data[J]. Quaternary International, 2007, 175(1): 71-85.
- [8] ZHANG C, LI Z L, CHEN Q J, et al. Provenance of eolian sands in the Ulan Buh Desert, northwestern China, revealed by heavy mineral assemblages[J]. CATENA, 2020, 193: 104624.
- [9] GARZANTI E, ANDÒ S, VEZZOLI G, et al. Petrology of the Namib Sand Sea: Long-distance transport and compositional variability in the wind-displaced Orange Delta[J]. Earth-Science Reviews, 2012, 112(3/4): 173-189.
- [10] LANCASTER N, BAKER S, BACON S, et al. Owens Lake dune fields: Composition, sources of sand, and transport pathways[J]. CATENA, 2015, 134: 41-49.
- [11] XU Z W, LU H Y, ZHAO C F, et al. Composition, origin and weathering process of surface sediment in Kumtagh Desert, Northwest China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(6): 1062-1076.

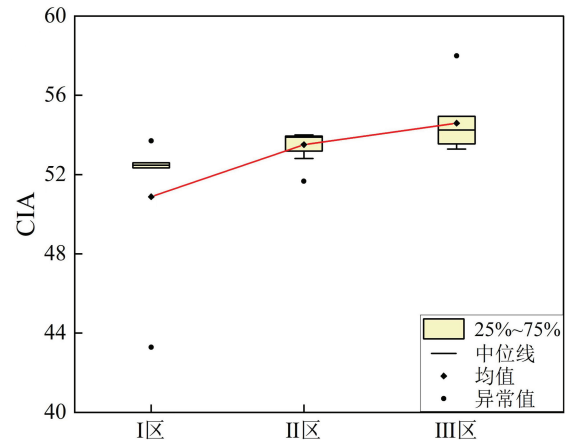


图4 古尔班通古特沙漠各区域CIA值

- [12] FAN Y X, LI Z J, WANG F, et al. Provenance variations of the Tengger Desert since 2.35 Ma and its linkage with the Northern Tibetan Plateau: Evidence from U-Pb age spectra of detrital zircons[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 223: 105916.
- [13] 赵万苍,刘连文,陈骏,等. 中国沙漠元素地球化学区域特征及其对黄土物源的指示意义[J]. *中国科学:地球科学*, 2019, 49(9): 1425-1438.
- ZHAO W C, LIU L W, CHEN J, et al. Geochemical characterization of major elements in desert sediments and implications for the Chinese loess source[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2019, 49(9): 1425-1438. (in Chinese)
- [14] FRANZINELLI E, POTTER P E. Petrology, chemistry, and texture of modern river sands, Amazon River system[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(1): 23-39.
- [15] JOHANSSON M J, STALLARD R F, MEADE R H. First-cycle quartz arenites in the Orinoco River Basin, Venezuela and Colombia[J]. *The Journal of Geology*, 1988, 96(3): 263-277.
- [16] NESBITT H W, YOUNG G M. Petrogenesis of sediments in the absence of chemical weathering: Effects of abrasion and sorting on bulk composition and mineralogy[J]. *Sedimentology*, 1996, 43(2): 341-358.
- [17] POTTER P E. Petrology and chemistry of modern big river sands[J]. *The Journal of Geology*, 1978, 86(4): 423-449.
- [18] SCHWAB F L. Framework mineralogy and chemical composition of continental margin-type sandstone[J]. *Geology*, 1975, 3(9): 487-490.
- [19] SUTTNER L J, BASU A, MACK G H. Climate and the origin of quartz arenites[J]. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 1981, 51(4): 235-246.
- [20] SUTTNER L J, DUTTA P K. Alluvial sandstone composition and paleoclimate, I. framework mineralogy[J]. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 1986, 56(3): 329-345.
- [21] ARBOGAST A F, MUHS D R. Geochemical and mineralogical evidence from eolian sediments for northwesterly mid-Holocene paleowinds, central Kansas, USA[J]. *Quaternary International*, 2000, 67(1): 107-118.
- [22] MUHS D R, HOLLIDAY V T. Origin of late Quaternary dune fields on the Southern High Plains of Texas and New Mexico[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2001, 113(1): 75-87.
- [23] LIU Q Q, YANG X P. Geochemical composition and provenance of aeolian sands in the Ordos Deserts, northern China[J]. *Geomorphology*, 2018, 318: 354-374.
- [24] PETTIJOHN F J, POTTER P E, SIEVER R. *Sand and sandstone*[M]. Berlin: Springer, 1972.
- [25] HERRON M M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data[J]. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 1988, 58(5): 820-829.
- [26] JIANG Q D, YANG X P. Sedimentological and geochemical composition of aeolian sediments in the Taklamakan Desert: Implications for provenance and sediment supply mechanisms[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2019, 124(5): 1217-1237.
- [27] MUHS D R. Mineralogical maturity in dunefields of North America, Africa and Australia[J]. *Geomorphology*, 2004, 59(1/2/3/4): 247-269.
- [28] VITAL H, STATTEGGER K. Major and trace elements of stream sediments from the lowermost Amazon River[J]. *Chemical Geology*, 2000, 168(1/2): 151-168.
- [29] BASU A. Petrology of Holocene fluvial sand derived from plutonic source rocks: Implications to paleoclimatic interpretation[J]. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 1976, 46(3): 694-709.
- [30] GREELEY R, IVERSEN J D. *Wind as a geological process: On Earth, Mars, Venus and Titan*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [31] KUENEN P H. Experimental abrasion 4: Eolian action[J]. *The Journal of Geology*, 1960, 68(4): 427-449.
- [32] 季方,叶玮,魏文寿. 古尔班通古特沙漠固定与半固定沙丘成因初探[J]. *干旱区地理*, 2000, 23(1): 32-36.
- JI F, YE W, WEI W S. Preliminary study on the formation causes of the fixed and semi-fixed dunes in Gurbantonggut Desert[J]. *Arid Land Geography*, 2000, 23(1): 32-36. (in Chinese)
- [33] 钱亦兵,周兴佳,李崇舜,等. 准噶尔盆地沙漠沙矿物组成的多源性[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(2): 182-187.
- QIAN Y B, ZHOU X J, LI C S, et al. Multi-sources of sand minerals for the deserts in the Jungger Basin[J]. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(2): 182-187. (in Chinese)
- [34] 黄雨振,陈秀玲,程良清,等. 准噶尔盆地表层沉积物的稀土元素特征与物源指示[J]. *第四纪研究*, 2018, 38(6): 1325-1335.
- HUANG Y Z, CHEN X L, CHENG L Q, et al. REE characteristics and its provenance implication of surface sediments in the Junggar Basin[J]. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(6): 1325-1335. (in Chinese)

- [35] 朱秉启, 于静洁, 秦晓光, 等. 新疆地区沙漠形成与演化的古环境证据[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 661-679.  
ZHU B Q, YU J J, QIN X G, et al. Formation and evolution of sandy deserts in Xinjiang: The palaeo-environmental evidences[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(5): 661-679. (in Chinese)
- [36] 郑孟林, 樊向东, 何文军, 等. 准噶尔盆地深层地质结构叠加演变与油气赋存[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 22-32.  
ZHENG M L, FAN X D, HE W J, et al. Superposition of deep geological structural evolution and hydrocarbon accumulation in the Junggar Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(1): 22-32. (in Chinese)
- [37] 王才川, 张革新, 周晓萌. 准噶尔盆地古尔班通古特沙漠地区水文地质特征及对石油开发的建议[J]. 河南科技, 2018(26): 74-76.  
WANG C C, ZHANG G X, ZHOU X M. The hydro-geological characteristics of the Junggar Basin Gurbantunggut Desert and the significance to the oil development[J]. *Henan Science and Technology*, 2018(26): 74-76. (in Chinese)
- [38] 钱亦兵, 吴兆宁, 张立运, 等. 古尔班通古特沙漠植被与环境的关系[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 2802-2811.  
QIAN Y B, WU Z N, ZHANG L Y, et al. Vegetation-environment relationships in Gurbantunggut Desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2802-2811. (in Chinese)
- [39] 李从娟, 李彦, 马健. 古尔班通古特沙漠土壤化学性质空间异质性的尺度特征[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 302-310.  
LI C J, LI Y, MA J. Scale characteristics of spatial heterogeneity of soil chemical properties in Gurbantunggut Desert[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2): 302-310. (in Chinese)
- [40] 钱亦兵, 吴兆宁, 杨海峰, 等. 古尔班通古特沙漠南部风沙土粒度分布的空间异质性[J]. 干旱区地理, 2009, 32(5): 655-661.  
QIAN Y B, WU Z N, YANG H F, et al. Spatial heterogeneity for grain size distribution of eolian sand soil in the southern Gurbantunggut Desert[J]. *Arid Land Geography*, 2009, 32(5): 655-661. (in Chinese)
- [41] 刘铮瑶. 古尔班通古特沙漠沙丘地貌及其发育环境[D]. 西安: 陕西师范大学, 2020.  
LIU Z Y. The landform and development environment of dunes in the Gurbantunggut Desert[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2020. (in Chinese)
- [42] 李杨, 刘艳, 张璞. 古尔班通古特沙漠植被覆盖变化及其对沙尘天气的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(3): 141-146.  
LI Y, LIU Y, ZHANG P. Desert vegetation coverage changes and their impacts on sand-dust weather in Gurbantunggut Desert[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(3): 141-146. (in Chinese)
- [43] 沈亚萍, 张春来, 李庆, 等. 中国东部沙区表层沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1): 150-157.  
SHEN Y P, ZHANG C L, LI Q, et al. Grain-size characteristics of surface sediments in the eastern desert regions of China[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(1): 150-157. (in Chinese)
- [44] 朱春鸣, 董治宝, 刘铮瑶, 等. 古尔班通古特沙漠树枝状沙丘沉积物粒度和微形态特征的空间分异[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 9-18.  
ZHU C M, DONG Z B, LIU Z Y, et al. Grain size and micro-morphology characteristics of the surface ediments of dendritic sand dunes in the Gurbantunggut Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(2): 9-18. (in Chinese)
- [45] 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.
- [46] HONDA M, SHIMIZU H. Geochemical, mineralogical and sedimentological studies on the Taklimakan Desert sands[J]. *Sedimentology*, 1998, 45(6): 1125-1143.
- [47] QIAN Y B, ZHOU X J, WU Z N, et al. Multi-sources of desert sands for the Jungger Basin[J]. *Journal of Arid Environments*, 2003, 53(2): 241-256.
- [48] 程同福. 新疆玛纳斯河悬移质泥沙特性分析[J]. 人民长江, 2016, 47(S1): 63-65.  
CHENG T F. Analysis of suspended sediment characteristics in Manas River, Xinjiang[J]. *Yangtze River*, 2016, 47(S1): 63-65. (in Chinese)
- [49] 钱亦兵, 周兴佳, 吴兆宁. 准噶尔盆地沙物质粒度特征研究[J]. 干旱区研究, 2000, 17(2): 34-41.  
QIAN Y B, ZHOU X J, WU Z N. Study on the grain size's characteristics of the sand materials in the Jungger Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2000, 17(2): 34-41. (in Chinese)
- [50] 王贵勇, 哈斯. 古尔班通古特沙漠蚀余沙丘的发现及其意义[J]. 第四纪研究, 2002, 22(3): 294.  
WANG G Y, HA S. Discovery and significance of eroded sand dunes in the Gurbantunggut Desert[J]. *Quaternary Sciences*, 2002, 22(3): 294. (in Chinese)
- [51] VON EYNATTEN H, TOLOSANA-DELGADO R, KARIUS V. Sediment generation in modern glacial settings: Grain-size and source-rock control on sediment composition[J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 280: 80-92.

- [52] GARZANTI E, ANDÒ S, VEZZOLI G. Grain-size dependence of sediment composition and environmental bias in provenance studies[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277(3/4): 422-432.
- [53] XIONG S F, DING Z L, ZHU Y J, et al. A ~6 Ma chemical weathering history, the grain size dependence of chemical weathering intensity, and its implications for provenance change of the Chinese loess-red clay deposit[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(15/16): 1911-1922.
- [54] GARZANTI E, ANDÒ S, PADOAN M, et al. The modern Nile sediment system: Processes and products[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 130: 9-56.
- [55] WIGGS G F S, LIVINGSTONE I, THOMAS D S G, et al. Effect of vegetation removal on airflow patterns and dune dynamics in the southwest Kalahari Desert[J]. *Land Degradation & Development*, 1994, 5(1): 13-24.
- [56] HESSE P P, TELFER M W, FAREBROTHER W. Complexity confers stability: Climate variability, vegetation response and sand transport on longitudinal sand dunes in Australia's Deserts[J]. *Aeolian Research*, 2017, 25: 45-61.
- [57] 王雪芹, 王涛, 蒋进, 等. 古尔班通古特沙漠南部沙面稳定性研究[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2004, 34(8): 763-768.  
WANG X Q, WANG T, JIANG J, et al. A study on the stability of sand surface in the southern Gurbantunggut Desert[J]. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 2004, 34(8): 763-768. (in Chinese)
- [58] 朱芳莹, 鹿化煜, 张文超, 等. 中国北方沙漠(沙地)地理底图绘制与地表动态过程分析: 基于3S技术的新结果[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(2): 197-205.  
ZHU F Y, LU H Y, ZHANG W C, et al. Mapping deserts and sandy fields in northern China and surface process analysis based on 3S techniques[J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(2): 197-205. (in Chinese)
- [59] KOCUREK G, LANCASTER N. Aeolian system sediment state: Theory and Mojave Desert Kelso dune field example[J]. *Sedimentology*, 1999, 46(3): 505-515.
- [60] LEE J A. The role of desert shrub size and spacing on wind profile parameters[J]. *Physical Geography*, 1991, 12(1): 72-89.
- [61] WOLFE S A, NICKLING W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 1993, 17(1): 50-68.
- [62] 刘小平, 董治宝. 直立植被粗糙度和阻力分解的风洞实验研究[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(1): 82-87.  
LIU X P, DONG Z B. Wind tunnel tests of the roughness and drag partition on vegetated surfaces[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(1): 82-87. (in Chinese)

责任编辑: 张自强

(上接第77页)

- [23] TROTMAN A, PUURULA A, BURGESS B. Improvements to BM25 and language models examined[C]//Proceedings of the 2014 Australasian Document Computing Symposium. Melbourne, VIC, Australia. ACM, 2014: 58-65.
- [24] LYU Y H, ZHAI C X. Lower-bounding term frequency normalization[C]//Proceedings of the 20th ACM International Conference on Information and Knowledge Management. October 24-28, 2011, Glasgow, Scotland, UK. ACM, 2011: 7-16.
- [25] YAO L, MAO C S, LUO Y. Graph convolutional networks for text classification[EB/OL]. 2018: arXiv: 1809.05679. <https://arxiv.org/abs/1809.05679.pdf>.
- [26] YANG X Q, LIU W Y. Maximal-semantics-augmented BertGCN for text classification[EB/OL]. *International Journal of Asian Language Processing*, 2023, <https://doi.org/10.1142/S2717554523500169>.
- [27] WU F, ZHANG T Y, DE SOUZA JR A H, et al. Simplifying graph convolutional networks[EB/OL]. 2019: arXiv: 1902.07153. <https://arxiv.org/abs/1902.07153.pdf>.
- [28] KINGMA D P, BA J. Adam: A method for stochastic optimization[EB/OL]. 2014: arXiv: 1412.6980. <https://arxiv.org/abs/1412.6980.pdf>.

责任编辑: 张自强