

常量化学元素记录的科尔沁沙地 地表沉积物风化特征

贾飞飞^{1,2,3}, 沈雪艳¹, 魏露露¹, 徐成琳¹

(1. 辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁大连 116029; 2. 青海大学三江源生态系统教育部野外
科学研究观测站, 青海西宁 810016; 3. 青海贵南荒漠生态系统国家定位观测研究站, 青海西宁 810016)

摘要: [目的] 以科尔沁沙地地表物质化学元素记录为切入点, 揭示沙地化学风化程度和空间特征, 分析影响地表物质化学风化的主要因素, 为进一步理解科尔沁沙地地表物质迁移过程以及沙地生态保护和修复工作提供科学依据。[方法] 通过采集和分析 118 个科尔沁沙地地表沉积物样品, 利用多种化学风化指数, 如化学蚀变指数(CIA)、斜长石风化指数(WIP)、斜长石蚀变指数(PIA), 以及成分变异指数(ICV)和地球化学分析三角图来评估科尔沁沙地地表空间风化特征, 并探讨影响区域风化的因素。[结果] ①科尔沁沙地整体处于化学风化的初等阶段, 不同类型沙地化学风化程度差异不明显。西南部及中部地区的化学风化强度略高于其他地区, 地表沉积物成熟度较低, 以初次循环沉积物为主; 沉积物风化以斜长石风化为, 处于脱 Na, Ca 阶段。②通过物源判别三角图解、函数二元图解分析, 指示出化学元素特征与中酸性花岗岩相似, 印证沉积物母岩主要来自中酸性花岗岩。物源区的岩石类型和矿物组成决定了风化作用的初始条件, 进而影响了风化过程的进行。③气候条件是控制风化作用的重要因素, 沙地西部化学风化强度与温度相关, 沙地东部化学风化强度与降水相关。此外, 沉积分异也会导致 CIA 值发生变化, 进而影响化学风化强度。[结论] 科尔沁沙地化学风化呈现“整体弱-局部异”的特征: 物源属性(中酸性花岗岩)奠定风化基础, 气候驱动空间差异, 沉积分异过程进一步放大了风化强度差异。

关键词: 沉积物; 风化指数; 影响因素; 科尔沁沙地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0025-10

中图分类号: K903, P596

文献参数: 贾飞飞, 沈雪艳, 魏露露, 等. 常量化学元素记录的科尔沁沙地地表沉积物风化特征[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 25-34. Jia Feifei, Shen Xueyan, Wei Lulu, et al. Weathering characteristics of surface sediments in Horqin sandy land revealed by major chemical elements [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 25-34. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.008; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.008.

Weathering characteristics of surface sediments in Horqin sandy land revealed by major chemical elements

Jia Feifei^{1,2,3}, Shen Xueyan¹, Wei Lulu¹, Xu Chenglin¹

(1. School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China; 2. Ministry of Education Field Scientific Observation and Research Station for the Sanjiangyuan Ecosystem at Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 3. Guinan Desert Ecosystem Positioning Observation and Research Station, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: [Objective] Using the chemical element records of surface sediments in Horqin sandy land as an entry point, this study aims to reveal the degree and spatial characteristics of chemical weathering, analyze the main factors influencing the chemical weathering of surface materials, and provide a scientific basis for further understanding the migration processes of surface materials in Horqin sandy land, as well as for its ecological protection and restoration efforts. [Methods] 118 surface sediment samples from Horqin sandy land, and were collected and analyzed multiple chemical weathering indices, including chemical alteration index (CIA),

收稿日期: 2025-04-21

修回日期: 2025-05-24

采用日期: 2025-05-26

资助项目: 辽宁省教育厅高校基本科研项目(自然科学类)辽宁西北部沙漠化土地时空演变及驱动因子分析(LJKMZ20221413); 青海大学三江源生态系统教育部野外科学研究观测站、青海贵南荒漠生态系统国家定位观测研究站两级财政项目

第一作者: 贾飞飞(1988—), 女(汉族), 山东省济宁市人, 博士, 副教授, 主要从事风沙地貌和沙地演化等方面的研究。Email: jiafeifei@lnnu.edu.cn.

plagioclase weathering index (WIP), plagioclase index of alteration (PIA), Compositional variability index (ICV), and geochemical triangular diagrams were utilized to assess the spatial weathering characteristics of the surface sediments in Horqin sandy land. Meanwhile factors influencing regional weathering were also investigated. [Results] ① Horqin sandy land as a whole was in the initial stage of chemical weathering, with insignificant differences in weathering degree among different types of sandy land. The chemical weathering intensity in the southwestern and central regions was slightly higher than in other areas, while the surface sediments exhibited low maturity and were primarily composed of first-cycle sediments. Weathering was dominated by plagioclase weathering, in the stage of Na and Ca leaching. ② Provenance discriminant diagrams and binary functional diagrams indicated that the geochemical characteristics resembled those of intermediate-acid granites. This confirmed that the parental rocks of the sediments were mainly derived from intermediate-acid granites. The rock types and mineral composition of the source area determined the initial conditions for weathering, thereby influencing the weathering process. ③ Climatic conditions were a significant factor controlling weathering. Chemical weathering intensity in the western part of the sandy land correlated with temperature, while in the eastern part, it correlated with precipitation. Additionally, sedimentary differentiation also caused variations in CIA values, consequently affecting chemical weathering intensity. [Conclusion] Chemical weathering in Horqin sandy land exhibits an 'overall weak but locally heterogeneous' pattern: Provenance attributes (intermediate-acid granites) establish the weathering foundation, climate drives spatial differences, and sedimentary differentiation processes further exacerbate the variations in weathering intensity.

Keywords: sediments; weathering indices; controlling factors; Horqin sandy land

化学风化是地表岩石和矿物在水、大气和生物活动作用下发生的化学成分改变和结构破坏的过程,是地表物质循环和元素迁移的重要环节,对土壤形成和区域地质环境稳定性影响深远^[1]。研究者多采用一些地球化学指标对沉积物的化学风化程度进行分析,评价其化学风化特征,以便开展古气候变化重建^[2]。沙地在亚洲风尘系统和陆地沉积系统中具有重要地位。它对气候变化极为敏感,能迅速响应气候条件的改变,进而影响风尘的生成、搬运和沉积过程,并对区域生态环境和全球气候系统产生反馈^[3]。而化学风化作用在沙地生态系统中扮演着极为关键的角色,其特征与沙地土壤质量、植被生长等生态要素紧密相联^[4]。风化程度较高的地表物质具有更强的养分释放能力,能为植被生长提供丰富的营养物质,从而利于植被生长。但过度风化会引发土壤侵蚀、肥力下降等问题,对生态环境造成破坏^[5]。深入研究沙地地表物质化学风化特征,不仅有助于全面、准确评估沙地生态环境质量状况,而且能够为沙地生态保护和修复工作提供一定的科学依据。

科尔沁沙地是中国北方最大的半固定沙地,该区具有半干旱和半湿润气候特点^[6],自然地理环境呈现出明显的过渡性特征,生态脆弱性较高。其地表沉积物的化学元素特征对于理解该地区的物质来源和沉积环境具有重要意义。谢远云等^[1]对沙地地表物质化学元素的分析发现,化学风化作用对该地区土壤形成和元素迁移有重要影响。刘璐等^[7]利用科

尔沁沙地38个样品分析了科尔沁沙地风化和沉积循环特征,并揭示了其对物源的指示性。李小妹等^[8]通过对沙地西部西拉木伦河流域地表沉积物的化学元素特征分析发现,不同河段化学风化程度存在差异,这种差异与其局地气候及地貌格局息息相关。尽管目前对于科尔沁沙地地表物质的化学元素和风化特征研究已经取得了一些成果,但也发现不同风化指标在不同区域对气候的敏感程度存在差异^[3],单一风化指标在大空间尺度上使用存在局限性等问题^[7]。因此,本研究以科尔沁沙地地表物质化学元素记录为切入点,通过计算多种风化指标,揭示沙地化学风化程度和空间特征,并探讨影响地表物质化学风化的主要因素。这项研究也将进一步深化对科尔沁沙地地表物质迁移过程的理解。

1 研究区概况

科尔沁沙地位于中国东北平原的西部,内蒙古自治区的东部,主要河流包括西拉木伦河、老哈河、新开河以及西辽河等。总面积约 $4.23 \times 10^4 \text{ km}^2$,是我国北方面积最大的沙地^[9]。地处华北克拉通北缘的燕山造山带和中亚造山带南缘的大兴安岭造山带之间,地势呈现出西高东低,南北高中部低的特点,区域内部发育多条断裂带和缝合带^[10],大兴安岭和燕山造山带的源岩属性均以花岗岩、中酸性火成岩为主,其中大兴安岭含少量玄武岩和辉绿岩等基性岩,燕山造山带含少量二长闪长岩等中性岩类。沙

地主要由第四纪松散沉积物组成,地带性土壤类型为栗钙土、黑钙土和栗褐土^[11],但在风蚀作用下多数已退化为风沙土^[12]。科尔沁沙地属于半干旱、半湿润大陆性季风气候,年平均气温较低,为5~8℃,昼夜温差大,盛行风向为西南风,春秋季节沙尘暴频发。年平均降水量为300~500 mm,降水主要集中在夏季,空间分布呈现出东多西少,南多北少的特点。沙丘类型东部为固定沙丘,中部以半固定—固定沙丘为主,西部以固定—半固定沙丘为主^[7]。

2 研究方法

2.1 样品采集与测试

在2021年7月和2023年4月对科尔沁沙地地表沉积物进行采样,采样地点尽量避免人为活动干扰,采样深度在0—5 cm,共采集地表沉积物样品118个。包括固定沙地样品49个,半固定沙地样品31个,流动沙地样品20个,河滩地样品9个以及湖滩样品9个(图1)。化学元素测量在辽宁师范大学试验中心利用X射线荧光光谱仪完成的。沉积物粒度测试使用贝克曼激光粒度仪完成。

2.2 指标数据计算与解释

本研究采用的化学风化指数包括:化学蚀变指数(chemical alteration index, CIA)、斜长石风化指数(plagioclase weathering index, WIP)、斜长石蚀变指数(plagioclase index of alteration, PIA)(表1)以及成分变异指数(compositional variability index, ICV)和A-CN-K, A-CN-K-FM图解法等对科尔沁沙地地表沉积物风化特征进行研究,评估样品的化学风化程度和成熟度。

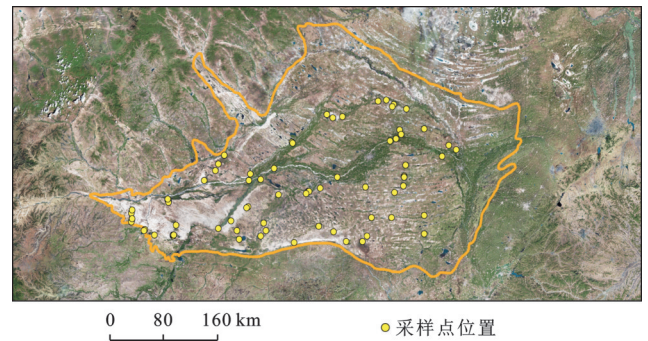


图1 科尔沁沙地样点分布

Fig.1 Distribution of sample points in Horqin sandy land

表1 化学风化指数及其他辅助指标的计算公式和指示意义

Table 1 Calculation formulas and significance of chemical weathering indices and other auxiliary indicators

指标名称	计算公式	风化增强时的指数变化	参考文献
CIA	$100 \times [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$	增大	Nesbitt(1982年) ^[13]
WIP	$100 \times [(2Na_2O/0.35) + (MgO/0.9) + (2K_2O/0.25) + (CaO^*/0.7)]$	减小	Parker(1970年) ^[14]
PIA	$100 \times [(Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O)]$	增大	Fedo(1995年) ^[15]
ICV	$Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO^* + MgO + TiO_2 / Al_2O_3$	减小	Coxr(1995年) ^[16]

注: CIA, WIP, PIA, ICV 分别为化学蚀变指数、斜长石风化指数、斜长石蚀变指数和成分变异指数。下同。

2.2.1 化学风化指标

长石是最富有活性的矿物,通常情况下,钾、钠、钙被侵蚀性土壤溶液从长石中除去,导致风化产物中氧化铝与碱的比例增加。CIA是通过计算样品中的铝、钠、钾和钙的氧化物的比值来衡量,能较好地衡量风化程度^[13]。数值越小表示沉积物处于干冷的气候环境,基本未遭受风化,数值越大表示处在温暖潮湿的环境中,经历了较强的化学风化。CIA值处于50.00~60.00为初始风化阶段,处于60.00~80.00为中等风化阶段,80.00~100.00为强烈风化阶段^[15]。含碱性和碱土金属元素的帕克风化指数WIP可以用于判断沉积物经历的化学风化程度^[14],依据风化产物中碱和碱土元素的比例评估硅酸盐岩石的风化强度,WIP对沉积循环和分选作用引起的石英和锆石富集更为敏感。WIP值小于25表示风化程度较强,25.00~50.00表示中等风化,大于50.00则风化程度

相对较弱。WIP值越小,表示风化作用越强。PIA指标^[15]是通过计算铝硅酸盐矿物中铝、钙、钠、钾的氧化物的比值来确定。计算过程去掉钾长石中的 Al_2O_3 ,故PIA适用于判断母岩中含有斜长石而不含钾长石的物源区风化程度。采用PIA可以用来校正斜长石的风化作用,精确推断源区的风化程度及物源区古气候环境。PIA值小于70.00为较低程度风化,在70.00~80.00则表明经历了中等程度的化学风化作用,大于80.00表示遭受了强烈的化学风化作用,风化程度较高。其值的大小会随着化学风化程度的增加而升高。

2.2.2 ICV与三角判别图解法

成分变异指数ICV虽不能直接量化化学风化程度^[17],但能够辅助判别化学风化,在化学风化过程中,随着岩石的风化程度增加,一些易迁移的元素(如Ca, Na等)会逐渐被淋失,而 Al_2O_3 等相对稳定的

成分含量相对增加,导致ICV值降低。故ICV对评估化学风化程度有一定指示作用。A-CN-K图解以 Al_2O_3 (A), $CaO+Na_2O$ (CN)和 K_2O (K)为3个端元。其中CaO代表存在于硅酸盐矿物中的CaO,不包括碳酸盐矿物中的CaO。不同的岩石和碎屑沉积物根据其化学组成的不同,落在图内的不同位置,以便了解样品的化学特征。图解内样品落点能反映源区的化学风化特征、预测长石的风化趋势、检测未经风化的源岩成分^[18]。若风化趋势趋近含钾矿物(蒙脱石和伊利石等)的连线,表示化学风化程度高;若接近于斜长石和钾长石连线,表明斜长石尚未完全风化;若平行于A-K连线,表明风化程度加剧,K从含钾矿物中大量淋失,蒙脱石和伊利石脱钾转变成高岭石等含铝矿物,风化趋势向A靠近,最终到达顶点A。Nesbitt等之后在A-CN-K图解基础上提出A-CN-K-FM三角图解^[18-19]。其中,A代表 Al_2O_3 ,CNK代表 $CaO+Na_2O+K_2O$ (其中CaO*仅指硅酸盐中的CaO),FM代表 $FeO+MgO$ 。该图解不仅能够反映化学风化程度,还能提供样品中铁镁矿物相对丰度和变化信息,历来被众多学者使用^[20-22]。图解中,若样品点沿CNK-FM线分布,表明样品主要受分选的影响,风化作用影响较小;若远离CNK-FM线的趋势,意味着铁镁质矿物在风化过程中发生了变化,导致铁镁的相对富集或亏损;若样品离A-CN-K线比较近,表明样品中铝与钙、钠、钾氧化物的相对含量或比例关系较为接

近或具有一定的相似性。若样品点靠近图解的边缘,表明风化程度较低;反之,则风化程度较高。

3 结果与分析

3.1 化学风化特征

沉积物的地球化学成分常被用于解释沉积物的源岩特征和物源,而沉积物化学成分又会受风化过程影响^[23]。化学风化指标能反映化学风化的强度,通过选用的元素差异可以建立多种类型的化学风化指标^[7]。从各指标结果来看,科尔沁沙地CIA值介于35.00~62.00,均值为56.32,指示科尔沁沙地整体上处于初始风化阶段,表明了科尔沁沙地经历了一定时期的寒冷干燥气候环境。WIP数值介于24.00~59.00,均值为38.83,PIA数值介于24.00~73.00,均值为65.16,这两个风化指数也表明科尔沁沙地经历了低等程度的化学风化。A-CN-K中(图2a)斜长石风化占据主导地位,伴随着Na和Ca元素的脱除。风化产物包括高岭石、蒙脱石和伊利石等黏土矿物。且风化趋势大致与A-CN连线平行,暗示了科尔沁沙地经历了相对较低程度的化学风化作用,可能在一个相对稳定的构造和气候条件下演化。此外,落点位置靠近A-CN-K线及图解边缘(图2b),表明样品中铝和钙、钠、钾氧化物的含量及比例相对接近,来源于具有相似特征的母岩或沉积环境,且同样经历了较低程度的化学风化。

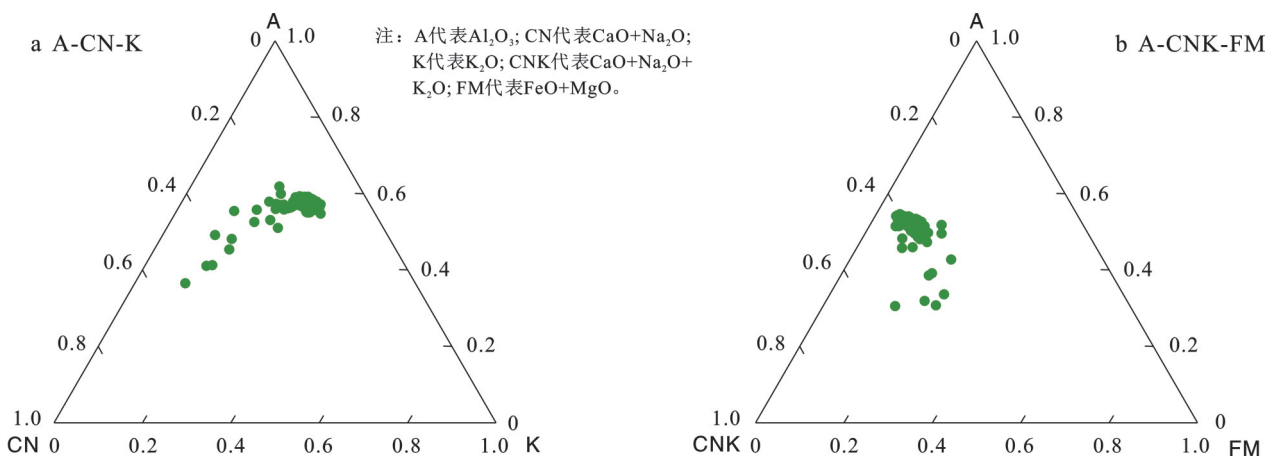


图2 科尔沁沙地A-CN-K和A-CN-K-FM三角判别图解

Fig.2 Ternary diagrams of A-CN-K and A-CN-K-FM in Horqin sandy land

从沙地类型来看(表2),研究区不同类型的沙地,各个风化指标差异性不明显。CIA值在固定沙地为36.50~59.91,半固定沙地为51.00~58.42,流动沙地为55.34~57.66;WIP值在固定沙地为28.88~58.42,半固定沙地为25.90~48.59,流动沙地为31.20~44.24;PIA值在固定沙地为32.48~70.69,半固定沙地

为51.98~69.74,流动沙地为62.87~70.18;ICV值在固定沙地为0.88~2.33,半固定沙地为0.86~1.07,流动沙地为0.87~0.99。4个化学风化指标均表明3种沙丘类型化学风化程度相近,但固定沙地不同样点化学风化强度略有差异,这可能与植被覆盖和地形变化有关。流动沙地不同样点化学风化强度差别最小。

表 2 不同类型沙地各个风化指标对比

Table 2 Comparison of various weathering indices for different types of sandy lands

沙地类型	内容	CIA	WIP	PIA	ICV
固定沙地	最大值	59.91	58.42	70.69	2.33
	最小值	36.50	28.88	32.48	0.88
	平均值	56.77	38.87	66.19	1.01
半固定沙地	最大值	58.42	48.59	69.74	1.07
	最小值	51.00	25.90	51.98	0.86
	平均值	56.79	35.87	66.14	0.98
流动沙地	最大值	57.66	44.24	70.18	0.99
	最小值	55.34	31.20	62.87	0.87
	平均值	57.00	38.74	67.31	0.92

从空间特征来看,科尔沁沙地西南部和中部地区的 CIA 值较高,约为 56.00~62.00,特别是在西拉

木伦河和老哈河流域 CIA 值整体高于 60.00。相比之下,新开河及西辽河中下游东部地区的 CIA 值较低,介于 52.00~55.00。而康平、双辽市和科右中旗的 CIA 值最低,约 35.00~39.00(图 3a)。WIP 值在西南部和中部地区约 24.00~34.00,而北部通榆、科右中旗及南部康平地区较高,介于 50.00~59.00(图 3b)。PIA 值在西南部和中部地区约 60.00~73.00,其中老哈河流域整体在 67.00~73.00,而北部科右中旗最低,约 24.00~31.00(图 3c)。ICV 值在西拉木伦河和老哈河流域较低,约 0.63~0.84,新开河以北和西辽河以南地区较高,约 0.95~2.75(图 3d)。总体而言,科尔沁沙地西南部及中部地区的风化程度略高于周围地区,表明科尔沁沙地的化学风化程度在不同区域存在显著的空间差异。这些风化差异特征可能受物源、气候条件、植被和沉积过程等多因素共同影响。

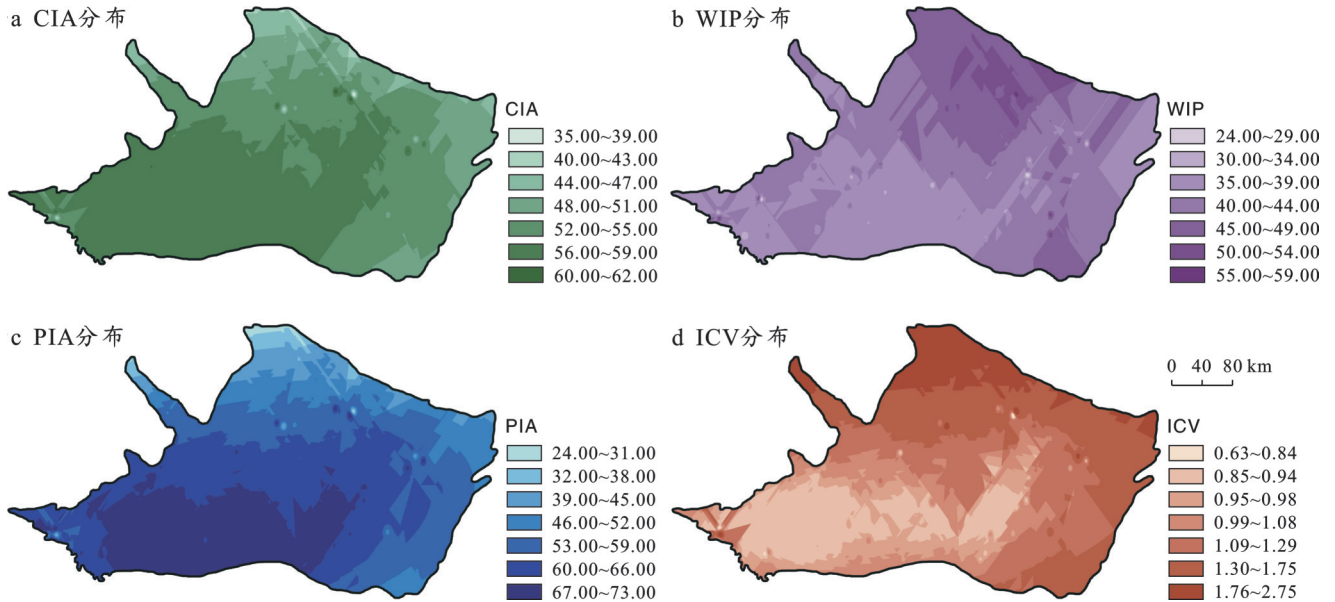


图 3 科尔沁沙地化学风化指标 CIA, PIA, WIP 和 ICV 空间分布

Fig.3 Spatial distribution of chemical weathering indices CIA, PIA, WIP and ICV in Horqin sandy land

3.2 源区成熟度和循环作用

成熟度是沉积物的成分成熟度,反映沉积物在风化、搬运和沉积过程中矿物成分的稳定性和变化程度,衡量了沉积物从原始的岩石经过风化和搬运后,其成分接近最稳定状态的程度。ICV 可用于辅助评估风化程度外,还能判断源区物质是否遭受再旋回作用^[17]、评估沉积物的成熟度特征^[16]。通常,成熟度低的沉积物 ICV 值一般大于 1^[24],反之,则小于 1,同时表明经历了再旋回作用或首次沉积时经历了强风化作用,暗示成熟度较高。研究区 ICV 均值为 1.02,表明沙地地表沉积物总体成熟度较低,而西南及中部大部分地区 ICV 值小于 1,指示成熟度略高于周围地区(图 3d)。

此外,利用 CIA-ICV 图解可以更加直观地判断沉积物的成熟度和风化程度^[25]。结果显示科尔沁沙地总体上表现出弱风化状态且黏土等矿物成分不多等特点(图 4a)。风化指数 WIP 不仅常用来评估沉积物或岩石的化学风化强度^[14],也可以与 CIA 结合使用,CIA-WIP 二元图解可以用来区分首次循环沉积物(原生沉积物)和再循环沉积物,当沉积物为初次循环沉积物时,CIA/WIP 比值小于 10,而多次循环沉积物的值在 10~100。数据结果显示科尔沁沙地 CIA/WIP 均值为 1.49,且所有样品点位于化学风化趋势线的下方靠近风化线(图 4b),指示科尔沁沙地地表沉积物再循环程度低,主要以初次循环沉积物为主^[23],成熟度较低。

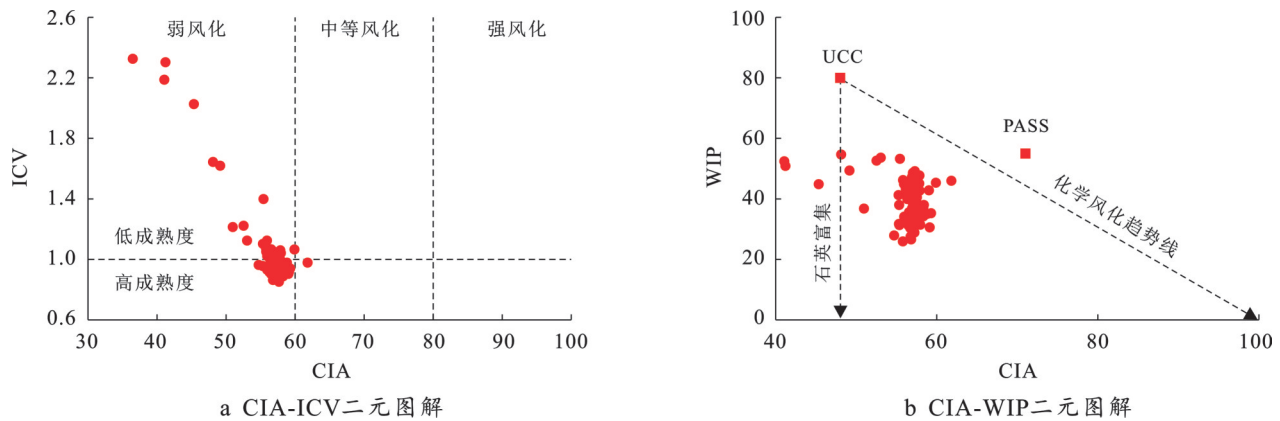


图 4 科尔沁沙地地表沉积物的成熟度与沉积再循环判别图解
Fig.4 Maturity and discrimination diagrams of sediment recycling in Horqin sandy land

4 讨论

4.1 物源对化学风化的影响

利用 $\text{SiO}_2/10\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3, (\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})\text{-CaO-Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{CaO-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ 三角图解能区分沙漠的区域矿物特征^[26], 其中 $\text{SiO}_2/10\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ 反映样品中石英—碳酸盐—硅酸盐矿物的相对含量变化(图 5a), $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})\text{-CaO-Fe}_2\text{O}_3$ 反映了长石-碳酸盐-铁镁质硅酸盐矿物的相对含量变化(图 5b), 而 $\text{CaO-K}_2\text{O-Na}_2\text{O}$ 反映碳酸盐-斜长石-钾长石/白云母的相对含量变化(图 5c)。样品中石英硅酸盐含量高于碳酸盐, 这与该区缺乏碳酸岩地层地质背景相吻合, 印证了该地区硅酸盐矿物的丰富性。同时含有较高的长石含量, 与该地区可能存在的长石质岩石来源相一致。此外样品中高含量钾长石, 该特征可能源于该地区富钾的花岗岩、玄武岩和二长花岗岩等岩石的风化产物^[27]。基于 7 个常量元素建立的物源判别函数二元图解中^[28](图 5d), 科尔沁沙地样品落在石英质沉积物物源区和长英质火成岩物源区, 进一步印证源于中酸性岩浆母岩。其他学者也曾利用重矿物组合特征等指示科尔沁沙地沉积物主要来自中酸性岩浆母岩, 且大多数为初次循环, 以及少数再循环沉积的混合^[10]。石英质沉积物物源区的岩石由于其较高的石英含量, 在风化过程中释放更多的硅酸盐, 从而促进了硅酸盐矿物的风化。而长英质火成岩物源区的岩石则在风化过程中释放更多的钾长石, 影响钾长石、白云母的相对含量变化^[13]。这些物源区的岩石类型和矿物组成决定了风化作用的初始条件, 从而影响风化过程的进行。此外, 科尔沁沙地地表物质粒径自东北向西南方向逐渐变细, 这与中亚造山带位于科尔沁沙地的北部有关。根据空间位置和主导风向, 风力是搬运中亚造山带物质的主要动力^[29]。沙地被大兴安岭、小兴安岭以及长白山等山脉三面包围, 西北风受

地形影响从西南方向进入, 而科尔沁沙地由于受到长期稳定的干冷气候影响, 使得春季西南风的势力范围持续扩大, 将细颗粒粉尘物质搬运至更远的地方。这种物源的搬运和沉积过程不仅影响了沙地的矿物组成, 也影响了风化作用的进行, 使得细颗粒粉尘物质在搬运过程中可能经历了更长时间的风化作用, 从而在沉积时具有更高的风化程度。

4.2 气候对化学风化的影响

气候条件作为风化过程的主要动力, 通过温度、降水与风力的协同作用深刻塑造着科尔沁沙地的风化格局^[30]。整体来看, 科尔沁沙地呈现出“东湿西干, 东冷西暖”的气候格局(图 6a), 而正是这种温度和降水的空间差异促使科尔沁沙地东、西部地表物质化学风化强度也出现差异。科尔沁沙地西部年均气温达 6.95°C , 西南部气温可达 8°C , 较高的温度会加速岩石中矿物质的溶解, 进一步提升化学反应速率^[31]。而东部地区年平均降水量明显高于西部(图 6b), 约 440 mm , 新开河与西辽河交汇处流域, 平均降水量可高达 580 mm , 充足的水分条件使得东部地区风化过程得以持续进行。其他相关研究也发现, 科尔沁沙地东、西部化学风化强度及影响因素具有空间异质性, 沙地东部风化指标与降水有较强的相关性, 而西部风化指标则与温度相关性较高^[3]。此外, 风力作用进一步强化了这种空间差异。该区盛行西北风, 南风 and 西南风次之^[32], 冬春季节风力强劲, 沙粒更容易碰撞摩擦, 使颗粒破碎细化^[12], 这种作用不仅加剧了地表物质的物理风化, 也会影响化学风化的进程。

4.3 沉积分异对化学风化的影响

化学风化作用会促使母岩发生化学反应, 生成新的矿物和可溶性物质, 导致岩石的组成和结构被破坏, 颗粒逐渐细化。而沉积分异作用对沉积物的矿物组成产生影响, 也会造成粗细颗粒中不同元素的富集, 进而影响化学风化指标 CIA 对真实化学风

化强度的指示。将样品平均粒径与 CIA 进行拟合 (图 7), 显示出地表粗粒沉积物的平均粒径与 CIA 值的相关性较好, 而较细的物质平均粒径与 CIA 值的相关性较差, 这一特点与邵菁清等^[33]研究结果一致。这表明粒度越细, 黏土组分相对富集, CIA 值就越高。

此外, 相关研究也指出, 粒度控制对风化程度影响显著^[34]。沉积粒度较小的地区化学风化往往较大。这进一步说明, 化学风化指标 CIA 会受到粒度的影响, 因此在评估化学风化强度时, 需要考虑粒度因素对指标的潜在影响。

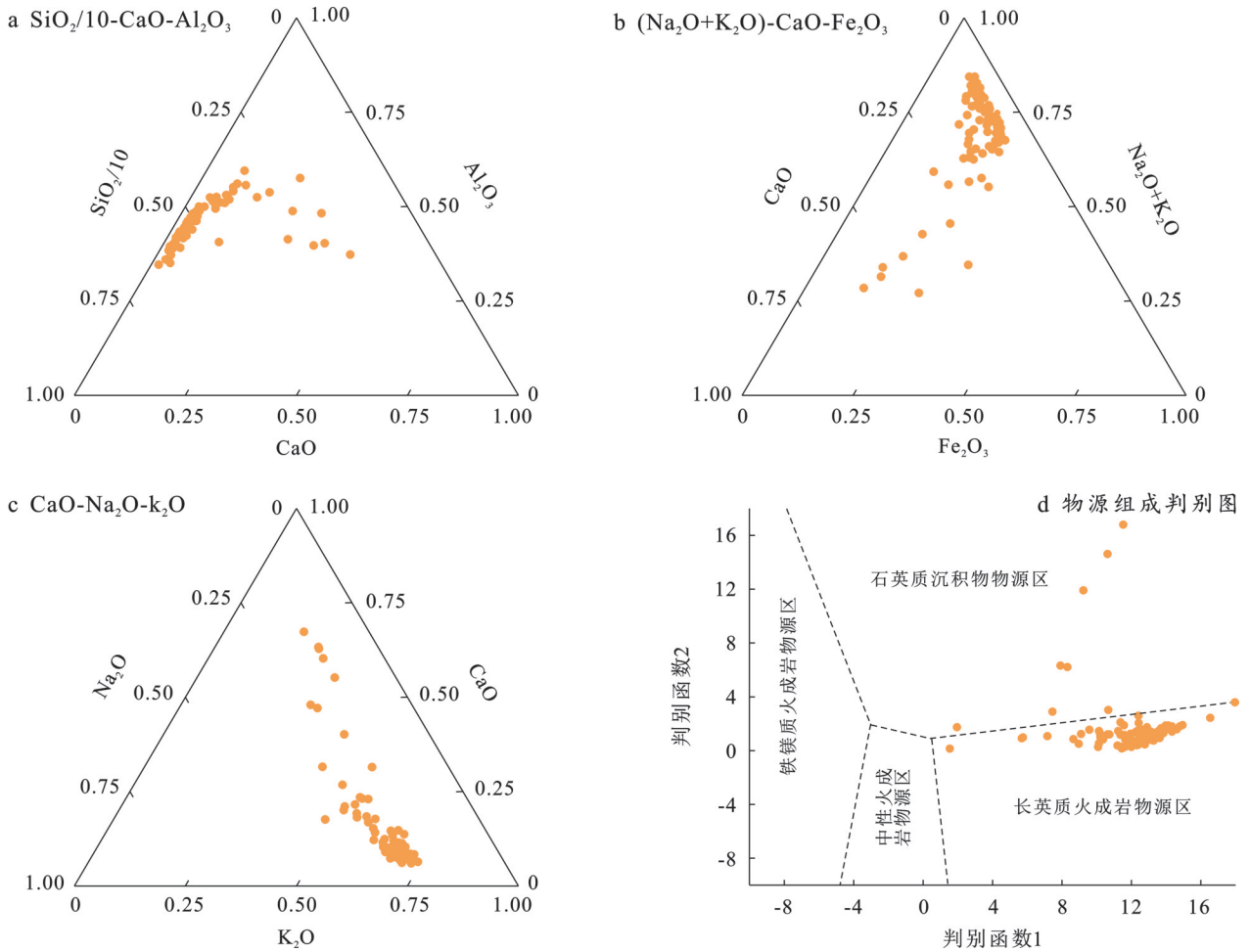


图 5 常量元素地球化学三角图与物源组成判别图

Fig.5 Geochemical ternary diagrams of major elements and provenance discrimination

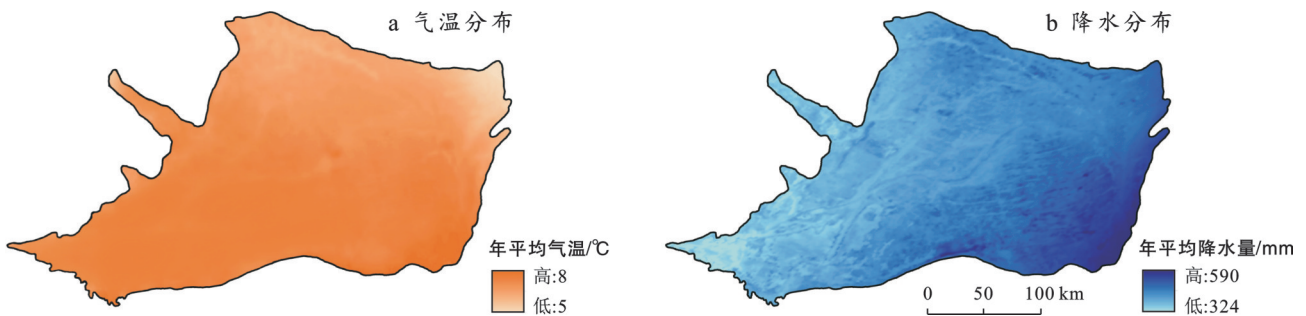


图 6 科尔沁沙地年平均气温和降水空间分布 (气候数据来源: 国家青藏高原科学数据中心)

Fig.6 Spatial distribution of annual mean temperature and precipitation in Horqin sandy land (Climate data source: National Tibetan Plateau Scientific Data Center)

5 结论

(1) CIA, WIP, PIA 及 ICV 指数均表明科尔沁

沙地整体处于化学风化的初等阶段, 经历了一个相对稳定的构造和干冷的气候条件。不同类型沙地化学风化程度差异不明显。空间上来看, 科尔沁沙地

西南部及中部地区的化学风化强度略高于其他地区。A-CN-K图解中风化路径与A-CN连线相近,表明早期风化以斜长石为主,伴随Na, Ca元素的流失,生成了高岭石、蒙脱石及伊利石等产物。A-CN-K-FM图解样品多集中于A-CNK线附近,反映相对一致的母岩和沉积背景。CIA-ICV图解表明沉积物的成熟度较低,黏土等矿物成分少。此外,CIA-WIP图解表明,其地表沉积物再循环程度低,以初次循环沉积物为主。

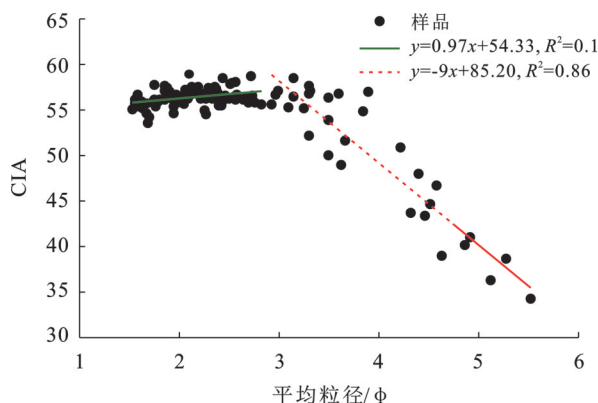


图7 科尔沁沙地地表沉积物粒径与CIA的关系

Fig.7 Relationship between surface sediment grain size and CIA in Horqin sandy land

(2) 通过物源判别三角图解和函数二元图解分析,沉积物的化学元素特征与中酸性花岗岩相似,表明其母岩主要来源于中酸性花岗岩。除风力搬运在沙地的形成和物质循环中起到重要作用外,物源区的岩石类型和矿物组成决定了风化作用的初始条件,进而影响了风化过程的进行。

(3) 气候条件是控制风化作用的重要因素之一,沙地西部化学风化强度与温度相关,沙地东部化学风化强度与降水相关。此外,沉积物的粒度特征也对风化作用产生了显著影响,沉积粒度的差异导致CIA值的变化,进一步证实了物源和沉积分异过程对风化特征的综合影响。

本研究揭示的科尔沁沙地化学风化空间差异,可以为沙地的生态保护和修复提供科学依据。在化学风化作用较强的西南部和中部地区,矿物的分解促进了细颗粒物质和营养元素的释放,可以为植被自然生长提供有利条件。而化学风化较弱的地区,粗颗粒物质占比高、土壤贫瘠,植被生长条件较差。针对沙地风化与土壤特性空间上的差异,未来可采取分区治理模式。

参考文献 (References)

[1] 谢远云,孟杰,郭令芬,等.松嫩平原杜蒙沙地地表物质的地化组成及风化特征[J].中国沙漠,2013,33(4):

1009-1018.

Xie Yuanyun, Meng Jie, Guo Lingfen, et al. Geochemical composition and weathering feature of surface sediment in the dumeng sandy land, northeast China [J]. Journal of Desert Research, 2013,33(4):1009-1018.

[2] Nesbitt H W, Young G M, McLennan S M, et al. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies [J]. Journal of Geology, 1996, 104 (5):525-542.

[3] 赵婉婷,王艳茹,谢远云,等.东北沙地化学风化强度的空间分布特征及其影响因素[J/OL](2024-02-08).沉积学报,https://link.cnki.net/doi/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.003.

Zhao Wanting, Wang Yanru, Xie Yuanyun, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of chemical weathering intensity for sandy land in northeast China [J/OL] (2024-02-08). Acta Sedimentologica Sinica, https://link.cnki.net/doi/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.003.

[4] 李玉强,王旭洋,郑成卓,等.科尔沁沙地防沙治沙实践与生态可持续修复浅议[J].中国沙漠,2024,44(4):302-314.

Li Yuqiang, Wang Xuyang, Zheng Chengzhuo, et al. The practice on prevention and control of aeolian desertification and suggestion on the ecologically sustainable restoration in the Horqin Sandy Land [J]. Journal of Desert Research, 2024,44(4):302-314.

[5] 王训明,周娜,郎丽丽,等.风沙活动对陆地生态系统影响研究进展[J].地球科学进展,2015,30(6):627-635.

Wang Xunming, Zhou Na, Lang Lili, et al. Aeolian processes and their effects on terrestrial ecosystem: An overview [J]. Advances in Earth Science, 2015, 30 (6) : 627-635.

[6] 廖婉约,介冬梅,高桂在,等.中晚全新世科尔沁沙地气候变化及沙地演化研究[J].干旱区地理,2024,47(11):1876-1886.

Liao Wanyue, Jie Dongmei, Gao Guizai, et al. Climate change and desert evolution of Horqin sandy land in the mid-late Holocene [J]. Arid Land Geography, 2024, 47 (11):1876-1886.

[7] 刘璐,谢远云,迟云平,等.地球化学组成对浑善达克沙地与科尔沁沙地风化和沉积循环特征及其物源的指示[J].海洋地质与第四纪地质,2021,41(4):192-206.

Liu Lu, Xie Yuanyun, Chi Yunping, et al. Geochemical compositions of the Onqin Daga sand land and Horqin sand land and their implications for weathering, sedimentation and provenance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2021,41(4):192-206.

[8] 李小妹,严平,钱瑶,等.西拉木伦河流域地表沉积物粒度、

- 化学元素分布特征[J].干旱区研究,2017,34(1):191-199.
- Li Xiaomei, Yan Ping, Qian Yao, et al. Spatial distribution of grain size and chemical elements in surface sediments in the Xar Moron River basin [J]. *Arid Zone Research*, 2017,34(1):191-199.
- [9] 秦小光,刘嘉麒,裘善文,等.科尔沁沙地及其古水文网的演化变迁[J].第四纪研究,2010,30(1):80-95.
- Qin Xiaoguang, Liu Jiaqi, Qiu Shanwen, et al. Development and evolution of Horqin sandy land and ancient hydrological networks [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(1):80-95.
- [10] 韩晓雨,迟云平,谢远云,等.科尔沁沙地风成细沙的物质组成特征及其对物源的指示[J].中国沙漠,2024,44(3):231-246.
- Han Xiaoyu, Chi Yunping, Xie Yuanyun, et al. Material composition characteristics of fine particles of eolian sand in Horqin sandy land and its indication to provenance [J]. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(3): 231-246.
- [11] 任鸿昌,吕永龙,杨萍,等.科尔沁沙地土地沙漠化的历史与现状[J].中国沙漠,2004,24(5):544-547.
- Ren Hongchang, Lü Yonglong, Yang Ping, et al. History and present status of desertification in Horqin sandy land region [J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(5):544-547.
- [12] 牛亚毅,刘蔚,董佳蕊,等.科尔沁沙地1961—2021年主要气象要素的变化特征:以奈曼旗为例[J].中国沙漠,2023,43(4):263-273.
- Niu Yayi, Liu Wei, Dong Jiarui, et al. The variation characteristics of main meteorological factors in Horqin sandy land during 1961—2021: A case study of Naiman Banner [J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(4): 263-273.
- [13] 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.
- [14] Parker A. An index of weathering for silicate rocks [J]. *Geological Magazine*, 1970,107(6):501.
- [15] Fedo C M, Wayne Nesbitt H, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance [J]. 1995,23(10):921-924.
- [16] Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995,59(14): 2919-2940.
- [17] 李绪龙,张霞,林春明,等.常用化学风化指标综述:应用与展望[J].高校地质学报,2022,28(1):51-63.
- Li Xulong, Zhang Xia, Lin Chunming, et al. Overview of the application and prospect of common chemical weathering indices [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2022,28(1):51-63.
- [18] 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.
- [19] Ahmad I, Mondal M E A, Satyanarayanan M. Geochemistry of Archean metasedimentary rocks of the Aravalli craton, NW India: Implications for provenance, paleoweathering and supercontinent reconstruction [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016,126:58-73.
- [20] 周德全,王世杰,刘秀明.石灰土(碳酸盐岩风化壳)形成地球化学过程研究[J].地球与环境,2005,33(2):31-38.
- Zhou Dequan, Wang Shijie, Liu Xiuming. Study on geochemical processes in limestone soil profiles [J]. *Geology-Geochemistry*, 2005,33(2):31-38.
- [21] 袁方,谢远云,詹涛,等.地球化学组成揭示的杜蒙沙地化学风化和沉积再循环特征及其对风尘物质贡献的指示[J].地理科学,2017,37(12):1885-1893.
- Yuan Fang, Xie Yuanyun, Zhan Tao, et al. Source-area weathering and recycled sediment for dumeng sandy land inferred from geochemistry compositions: Implication for contribution to aeolian dust [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017,37(12):1885-1893.
- [22] 宁泽,张勇,林学辉,等.闽北近岸海域表层沉积物的风化特征及物源指示[J].海洋地质前沿,2020,36(10):12-21.
- Ning Ze, Zhang Yong, Lin Xuehui, et al. Weathering characteristics and provenance of the surface sediments in the offshore of northern Fujian [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020,36(10):12-21.
- [23] 兰凯,刘喜婷,李铁刚,等.山东半岛近岸沉积物化学风化强度对古气候和海平面变化的响应机制[J].海洋科学进展,2025,43(3):609-625.
- Lan Kai, Liu Xiting, Li Tiegang, et al. Chemical weathering intensity of coastal sediments off the Shandong peninsula in response to climatic and sea-level changes [J]. *Advances in Marine Science*, 2025,43(3): 609-625.
- [24] Cullers R L, Podkovyrov V N. Geochemistry of the Mesoproterozoic lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: Implications for mineralogical and provenance control, and recycling [J]. *Precambrian Research*, 2000,104(1/2):77-93.
- [25] 赵子霖,周雪威,李夔洲,等.辽东湾海域新元古界长龙山组石英砂岩物源特征及其地质意义[J].沉积学报,2024,42(4):1342-1353.
- Zhao Zilin, Zhou Xuewei, Li Kuizhou, et al. Characteristics by provenance of quartz sandstone from the Neo-

- proterozoic changlongshan formation in the offshore Liaodong Bay and its geological significance [J]. *Acta Sedi-mentologica Sinica*, 2024,42(4):1342-1353.
- [26] 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 Wancang, Liu Lianwen, Chen Jun, et al. Geochemical characterization of major elements in desert sediments and implications for the Chinese loess source [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2019,49(9):1425-1438.
- [27] Liu Jianqiang, Chen Lihui, Zeng Gang, et al. Lithospheric thickness controlled compositional variations in potassic basalts of northeast China by melt-rock interactions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(6): 2582-2589.
- [28] Roser B P, Korsch R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data [J]. *Chemical Geology*, 1988,67(1/2):119-139.
- [29] 张瀚之,鹿化煜,弋双文,等.中国北方沙漠/沙地锆石形态特征及其对物源的指示[J].*第四纪研究*,2013,33(2):334-344.
Zhang Hanzhi, Lu Huayu, Yi Shuangwen, et al. Zircon typological analyses of the major deserts/sand fields in northern China and its implication for identifying sediment source [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(2): 334-344.
- [30] 李传想,宋友桂.新疆伊犁黄土化学风化特征及其控制因素[J].*高校地质学报*,2011,17(4):611-619.
Li Chuanxiang, Song Yougui. Chemical weathering characteristics and controlling factors of the Ili loess, Xinjiang [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2011,17(4):611-619.
- [31] White A F, Blum A E, Bullen T D, et al. The effect of temperature on experimental and natural chemical weathering rates of granitoid rocks [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999,63(19/20):3277-3291.
- [32] 张华,李锋瑞,张铜会,等.科尔沁沙地人工杨树林生态服务效能评价[J].*应用生态学报*,2003,14(10):1591-1596.
Zhang Hua, Li Fengrui, Zhang Tonghui, et al. Evaluation of ecological services of *Populus simonii* forest on Heerqin sandy land [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003,14(10):1591-1596.
- [33] 邵菁清,杨守业.化学蚀变指数(CIA)反映长江流域的硅酸盐岩化学风化与季风气候?[J].*科学通报*,2012,57(11):933-942.
Shao Jingqing, Yang Shouye. The Chemical Alteration Index (CIA) reflects the chemical weathering of silicate rocks and the monsoon climate in the Yangtze River basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(11): 933-942.
- [34] 常海钦,付亚龙,林鑫,等.流域盆地化学风化强度空间分布及控制因素研究:以长江和珠江为例[J].*地球科学进展*,2019,34(1):93-102.
Chang Haiqin, Fu Yalong, Lin Xin, et al. Spatial distribution and controlling factors of chemical weathering intensity in drainage basins: A case study in the Yangtze River basin and Pearl River basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2019,34(1):93-102.
- ~~~~~
- (上接第 24 页)
- [29] Anderson A N, McBratney A B, FitzPatrick E A. Soil mass, surface, and spectral fractal dimensions estimated from thin section photographs [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996,60(4):962-969.
- [30] Tian Dalang, Xie Qiang, Fu Xiang, et al. Experimental study on the effect of fine contents on internal erosion in natural soil deposits [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020,79(8):4135-4150.
- [31] 聂慧莹,王文龙,郭明明,等.降雨条件下两种土壤类型工程堆积体坡面水沙关系与侵蚀动力特征[J].*应用生态学报*,2020,31(9):3141-3153.
Nie Huiying, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al. Runoff-sediment relationship and erosion dynamic characteristics for two types of engineering deposits under rainfall condition [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020,31(9):3141-3153.
- [32] 吕俊容,张文博,胡锦昇,等.连续降雨下不同砾石含量工程堆积体土壤侵蚀[J].*水科学进展*,2019,30(2): 210-219.
Lyu Jiaorong, Zhang Wenbo, Hu Jinsheng, et al. Effects of rock fragment content on erosion characteristics of spoil heaps under multiple rainfall events [J]. *Advances in Water Science*, 2019,30(2):210-219.
- [33] 吴孟韩,姜禹彤,关雪,等.中国阿尔泰山流域侵蚀速率及其控制因素[J].*冰川冻土*,2022,44(4):1357-1369.
Wu Menghan, Jiang Yutong, Guan Xue, et al. Basin-wide erosion rate in Chinese Altai Mountains and its controlling factors [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022,44(4):1357-1369.
- [34] Dadson S J, Hovius N, Chen H, et al. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen [J]. *Nature*, 2003,426(6967):648-651.
- [35] 李兴华.黄土高陡边坡降雨侵蚀径流运动过程及输沙规律研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
Li Xinghua. Study on erosion runoff movement process and sediment transport law of high and steep slope [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F Univers