

文章编号:1000-0550(2025)06-1992-12

东北沙地化学风化强度的空间分布特征及其影响因素

赵婉婷¹,王艳茹^{1,2},谢远云^{1,2},迟云平^{1,2},康春国³,汪烨辉¹,吴鹏¹,孙磊¹,魏振宇¹,
刘海金¹

1. 哈尔滨师范大学地理科学学院, 哈尔滨 150025

2. 哈尔滨师范大学寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室, 哈尔滨 150025

3. 哈尔滨学院地理系, 哈尔滨 150086

摘要 【目的】化学风化作用是调节地球长期气候与参与全球碳循环的关键地质过程,对陆地气候演化与古气候重建尤为重要。【方法】对东北四大沙地(浑善达克沙地、科尔沁沙地、松嫩沙地和呼伦贝尔沙地)的89个风成砂和河流砂细颗粒组分($<63\ \mu\text{m}$)的化学风化特征进行分析,揭示东北沙地化学风化的空间分布特征,评估13个风化指标对气候因子(年均温度和年均降水量)的响应关系及其影响因素。【结果】同一个化学风化指标(例如化学蚀变指数,CIA)在不同沙地中表现出较差的空间分布规律,与气候因子的相关性也较差($r\leq 0.4, p>0.05$);但不同风化指标在不同沙地中与气候因子的相关性较好($r\geq 0.6, p\leq 0.05$),这表明不同风化指标在不同区域对气候的敏感程度存在差异,因此使用不同指标度量的东北沙地化学风化总体受控于气候因素,但不同沙地的化学风化强度与温度和降水量的相关性仍存在明显差异。总体上东北沙地大部分地区具有较低的化学风化强度并存在明显的空间分布特征。浑善达克沙地、科尔沁沙地东部和松嫩沙地的化学风化强度主要受降水因子影响,受控于河流作用、季风降水、地理位置和植被覆盖率等因素;科尔沁沙地西部的化学风化强度主要受温度因子影响,受地形以及较高的年均温度等因素控制;呼伦贝尔沙地的化学风化强度受温度、降水因子的影响均较弱,非气候因素(如地形、风蚀、物理风化和植被覆盖率等)可能削弱了气候对化学风化的影响。【结论】东北沙地的化学风化程度主要受气候条件的控制,但在不同沙地中不同风化指标代表的化学风化对气候的敏感程度具有显著差异。因此,在利用沉积物化学风化指标进行古气候重建时需要谨慎选择。

关键词 东北沙地;化学风化强度;气候;空间分布;相关性分析

第一作者简介 赵婉婷,女,2001年出生,硕士研究生,第四纪地质与环境演化,E-mail: 2633138946@qq.com

通信作者 王艳茹,女,博士,讲师,E-mail: 350055788@qq.com

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

DOI 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.003

CSTR 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.003

0 引言

沙地作为亚洲风尘系统的一个重要端元和陆地沉积系统的关键组成部分,对于区域乃至全球气候变化都十分敏感^[1-5]。尤其是组成沙地的细粒沉积物经过产出、搬运、沉积与再循环等过程均会受到不同程度的风化与改造^[6-7]。而化学风化作用控制着地表沉积物的循环演化过程^[8-9]、元素的迁移与淋滤^[10]并长期调节全球气候系统^[11-12],在古降水^[13-14]和古环境重建^[15]等方面发挥着重要作用。沙地中风化作用能够反映一定时期内温度和降水量的变化,从而对揭示

沙地的形成演化过程和气候与环境变化具有巨大潜力。

中亚干旱地区沙漠/沙地沉积物的化学风化特征是古气候重建的重要依据,已有研究有效地揭示了干旱—半干旱地区的古气候变化规律和机制^[16-21]。相比之下,位于季风边缘区、气候敏感度高的东北沙地的研究相对薄弱,主要集中在古气候和古环境的演变、物源分析等方面^[22-25]。例如,赵延卓等^[26]利用呼伦贝尔沙地中古土壤剖面的特征,重建了呼伦贝尔沙地的气候演化过程;Xie *et al.*^[27-28]运用东北沙地的地球化学和同位素特征,反映了沙地的风化循环、物

收稿日期:2023-11-28;修回日期:2024-01-03;录用日期:2024-02-08;网络出版日期:2024-02-08

基金项目:黑龙江省自然科学基金项目(ZD2023D003);国家自然科学基金项目(42171006,41601200)[Foundation: Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, No. ZD2023D003; National Natural Science Foundation of China, No. 42171006, 41601200]

源及区域气候驱动机制。然而,目前对于东北沙地沉积物的化学风化的影响因素及其气候因素的敏感性研究依然匮乏,这不利于深入理解沙地演化过程的内在动力,也影响了干旱—半干旱地区古气候重建的精度和可靠性。因此,有必要对东北沙地沉积物中的化学风化指标进行深入研究,探讨其与气候因子(如温度和降水量)的耦合关系,以期干旱—半干旱地区的古气候重建提供更有力的证据和方法。

本研究以东北沙地的风成砂和河流砂中的细颗粒组分($<63\ \mu\text{m}$)为介质,在元素地球化学分析的基础上,选取了浑善达克沙地(ODSL)、科尔沁沙地(HQSL)、松嫩沙地(SNSL)和呼伦贝尔沙地(HLSL)四个沙地为研究对象,分析不同沙地化学风化强度的空间分布特征,探讨温度、降水量等气候因子与风化强度的耦合关系,并为东北地区沙地环境治理提供理论依据。

1 研究区概况

东北沙地是中国北方最大的沙地,总面积约为 $190\times 10^4\ \text{km}^2$,主要由浑善达克沙地、科尔沁沙地、松嫩沙地和呼伦贝尔沙地组成^[27](图1)。浑善达克沙地位于内蒙古锡林郭勒草原,沙层覆盖广泛、丘间平地较为开阔,属于温带干旱、半干旱大陆性气候,主

导风向为西北风^[29-30]。平均年降水量为270~518 mm,年平均气温为 $-2.8\ ^\circ\text{C}\sim 5.6\ ^\circ\text{C}$;科尔沁沙地位于西辽河中下游,属于温带大陆性半干旱气候,盛行风向为西南风^[29,31]。平均年降水量为381~559 mm,年平均气温为 $5.0\ ^\circ\text{C}\sim 8.1\ ^\circ\text{C}$;松嫩沙地位于松嫩平原西北部,以半固定—固定沙丘为主,活动沙丘较少。属于温带季风气候区,冬季盛行西北风,夏季盛行西南风^[32-33]。平均年降水量为390~588 mm,年平均气温为 $2.6\ ^\circ\text{C}\sim 5.9\ ^\circ\text{C}$;呼伦贝尔沙地位于呼伦贝尔市西南部,属于温带大陆性季风气候,盛行风方向为西北风^[28]。平均年降水量为255~548 mm,年平均气温为 $-5.7\ ^\circ\text{C}\sim 2.0\ ^\circ\text{C}$ (图1)。

2 样品采集与实验方法

2.1 样品采集

为尽量减少人为活动的干扰,采样点均远离城镇,样品采集时首先需要将表层土刮开再进行取样,之后利用220目目标筛选出小于 $63\ \mu\text{m}$ 粒级的风成砂和河流砂。本研究共采集了89个样品,其中浑善达克沙地13个、科尔沁沙地20个、呼伦贝尔沙地12个、松嫩沙地44个(采自黑龙江沙地(杜蒙沙地、齐齐哈尔沙地、肇源、林甸、大庆)、吉林沙地(白城、松原、榆树、乾安)和第二松花江),采样点位置如图1所示。

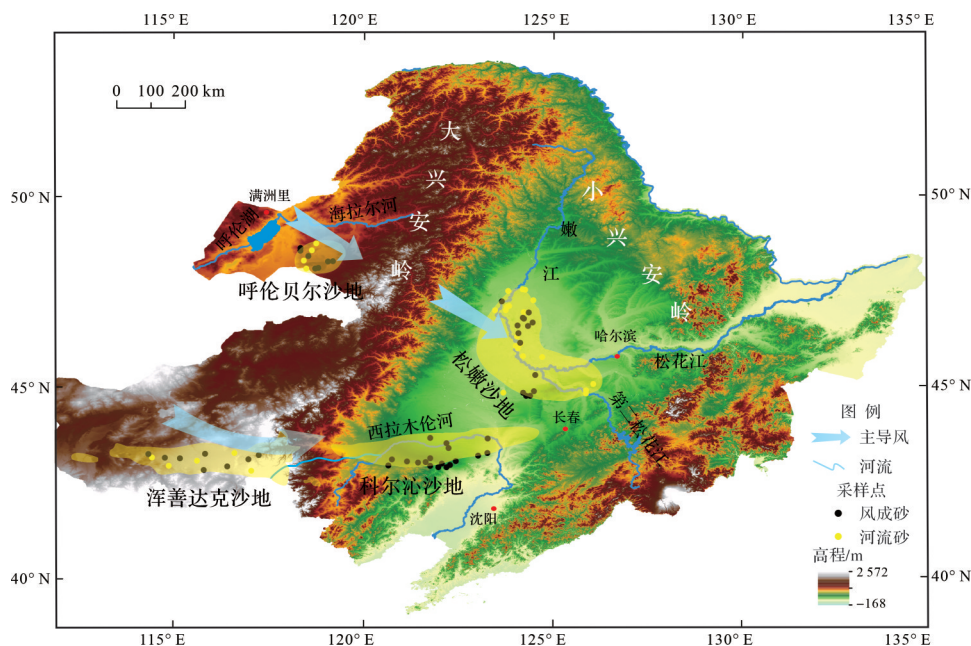


图1 东北沙地空间展布DEM图(图片来源于阿里云数据可视化平台)

Fig.1 Digital elevation model (DEM) map of spatial distribution of Northeast sandy land (image is sourced from Alibaba Cloud Data Visualization Platform)

2.2 实验方法

2.2.1 元素地球化学分析

常量元素采用玻璃熔片法制备,以规避矿物类型或组合分布不均匀导致的X射线系数吸收差异^[34]。制备完成后使用荷兰帕纳科XRF光谱仪进行测量。微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,结果显示元素的相对误差均小于2%。

2.2.2 化学风化参数

本研究采用度量化学风化程度的参数有化学蚀变指数(Chemical Index of Alteration, CIA)、化学风化指数(Chemical Index of Weathering, CIW)、化学蚀变指标(Chemical Proxy of Alteration, CPA)、Rb/Sr、Mg/Al、Na/K、Ca/Al、元素迁移指数 $\alpha^{Al}E$ 。

化学蚀变指数是利用母岩主要碱金属和碱土金属元素(Na、K和Ca)来评估化学风化程度的一种方法^[35],公式为:

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100 \quad (1)$$

式中:CaO^{*}是硅酸盐中的CaO含量^[36],氧化物代表每个样品相应的氧化物的百分含量。CIW与CIA相同,只是从等式的基础上消除了K₂O^[37],公式为:

$$CIW = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O)] \times 100 \quad (2)$$

CPA为反映钠长石淋溶强度的适宜指标^[38],公式为:

$$CPA = Al_2O_3 \times 100 / (Al_2O_3 + Na_2O) \quad (3)$$

$\alpha^{Al}E$ 值用于评估样品中移动元素相对于沉积物样品和上大陆地壳(UCC)中非移动元素Al浓度,公式为:

$$\alpha^{Al}E = (Al/E)_{\text{样品}} / (Al/E)_{UCC} \quad (4)$$

通常, $\alpha^{Al}E > 1$ 表示样品中E元素相对UCC的消耗; $\alpha^{Al}E < 1$ 表示富集, $\alpha^{Al}E = 1$ 表示无净消耗^[39]。

2.2.3 气候数据

为了获取研究区气候(温度、降水量)数据,利用Arcgis软件的提取工具将1970—2000年全球的平均温度、年平均降水量栅格图层(<https://www.worldclim.org/data/index.html>)与采样点的实测经纬度数据进行提取,得到采样点的年平均温度和平均年降水量(图2)。整体上,东北沙地的平均年降水量与年平均温度呈现明显递变规律。

2.2.4 相关性分析

为明确各风化指数与气候因子之间的耦合关系,利用Correlation Plot和线性回归分析探究了二者的相关性。相关性分析使用Origin软件进行。

3 结果

常量元素在四个沙地中呈现出高度的一致性,SiO₂含量最高,其次是Al₂O₃。浑善达克沙地具有较高的CaO、TiO₂。相较于大陆上地壳(Upper Continental Crust, UCC),MnO、TiO₂明显富集,Al₂O₃、Na₂O、K₂O轻微亏损,Fe₂O₃、MgO、CaO、P₂O₅明显亏损,SiO₂与UCC含量较为接近(图3a)。

微量元素在各个沙地中具有差异性,但整体变化趋势大概一致。与UCC相比,过渡元素(Trace Transition Elements, TTE)中,Ga较为亏损,Sc、Zn、Ni、Cu、Co明显亏损,V轻微富集,Cr明显富集;大离子亲石元素(Large Ion Lithophile Elements, LILE),Cs、Ba

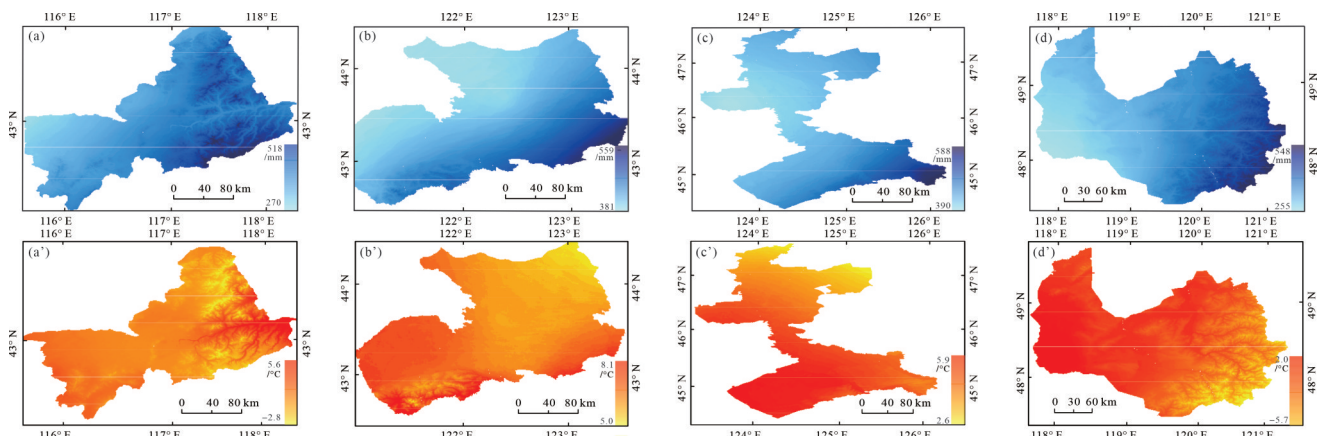


图2 东北沙地1970—2000年平均年降水量、年平均温度示意图

(a~d)年平均降水量;(a'~d')年平均温度;(a, a')浑善达克沙地;(b, b')科尔沁沙地;(c, c')松嫩沙地;(d, d')呼伦贝尔沙地

Fig.2 Diagram of annual average precipitation and temperature in the Northeast sandy land from 1970 to 2000

(a-d) annual average precipitation; (a'-d') annual average temperature; (a, a') Hunshandake sandy land; (b, b') Horqin sandy land; (c, c') Songnen sandy land; (d, d') Hulunbuir sandy land

明显富集, Rb、Sr明显亏损, Pb轻微富集; 高场强元素 (High Field Strength Elements, HFSE), Y 轻微富集, Nb、Ta 明显亏损, Th、U、Zr、Hf 变化较大 (图 3b)。

沉积物稀土总量 (ΣREE) 介于 129.55~246.54, 平均值为 192.24, 高于 UCC (146.37)^[39] 和 PAAS (184.77)^[40]。稀土元素分配模式表现出与 UCC、PAAS 相似的趋势, 总体呈现“左陡右缓”的趋势, 表明轻稀土富集, 重稀土元素亏损。沉积物的轻稀土元素总量 (ΣLREE) 介于 114.93~223.96, 平均值为 173.24。重稀土元素总量 (ΣHREE) 介于 14.00~22.73, $\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE}$ 介于 7.86~9.92, 平均值为 9.04, 同样说明了轻稀土相对比较富集。所有样品都显示出 Eu (0.90~1.30) 负异常, Ce 负异常不明显的特征 (图 3c)。

4 讨论

4.1 化学风化强度的空间分布特征

化学风化作用控制地表演化并长期调节全球气候, 在揭示气候与环境变化、古环境重建等方面具有重要意义。风化指标能够表征化学风化作用的强度^[41], 通常来说, 前人研究多以同一指标进行化学风化强度的比较, 以便更为直观地获得不同地区的化学风化强度^[42]。但此次研究发现, 在大空间尺度内简单使用某一种化学风化指标来表征整个区域内的化学风化强度特征的结果并不理想。以 CIA 为例, CIA 与气候的相关性较差 (图 4) 且通过 CIA 重建的东北沙地整体化学风化特征并不具有明显的空间分布规律 (图 5), 然而使用与区域气候因素相关性较高的指标重建区域风化特征却可以获得有效的空间分布特征 (图 6), 表明不同指标的敏感程度在不同区域内具

有差异性, 因此应该慎重选择风化指标来度量大空间尺度的化学风化程度。

沙地的化学风化强度大部分受气候因子控制 (图 4), 所以选择了与气候相关性较高的风化指标来表达沙地化学风化强度的空间分布特征。结果表明, 浑善达克沙地中的 Mg/Al 值、科尔沁沙地中的 $\alpha^{\text{Al}}\text{Rb}$ 值、松嫩沙地中的 Rb/Sr 值和呼伦贝尔沙地中的 Ca/Al 值与气候因子相关性最高, 因此选择以上四项指标来判断沙地的化学风化空间分布特征。

浑善达克沙地 Mg/Al 值变化范围为 0.068~0.109。西南部大范围与中东部小范围内 Mg/Al 值最高 (0.089~0.109), 中部与最东部值最低 (0.068~0.076)。受元素淋滤作用的影响, Mg/Al 值与化学风化强度呈负相关。因此, 浑善达克沙地西南部以及中东部地区为低等化学风化, 中部与最东部属于中等化学风化, 其余大部分地区为弱—中等化学风化 (图 6a)。

科尔沁沙地 $\alpha^{\text{Al}}\text{Rb}$ 值的变化范围为 0.74~1.29, 大致呈现中间较高, 向外围逐渐减弱的趋势。受元素迁移的影响, 化学风化越强烈, $\alpha^{\text{Al}}\text{Rb}$ 值越高, 反之越小。该沙地东南部的 $\alpha^{\text{Al}}\text{Rb}$ 值最高 (1.17~1.29), 表明化学风化作用最强, 向四周风化强度逐渐减弱, 直至低等化学风化 (图 6b)。

松嫩沙地的 Rb/Sr 比值 (0.24~0.46) 整体上呈自南向北逐渐递减的趋势, 西部和北部局部地区的 Rb/Sr 比值相对较高 (0.32~0.38)。Rb 化学性质较为稳定, 而 Sr 则相对活泼, 所以 Rb/Sr 值与化学风化作用间呈正向变化。因此, 沙地南部可能经历了较强的化学风化, 向北化学风化减弱, 且松嫩西部和北部的风化程度明显高于中部地区 (图 6c)。

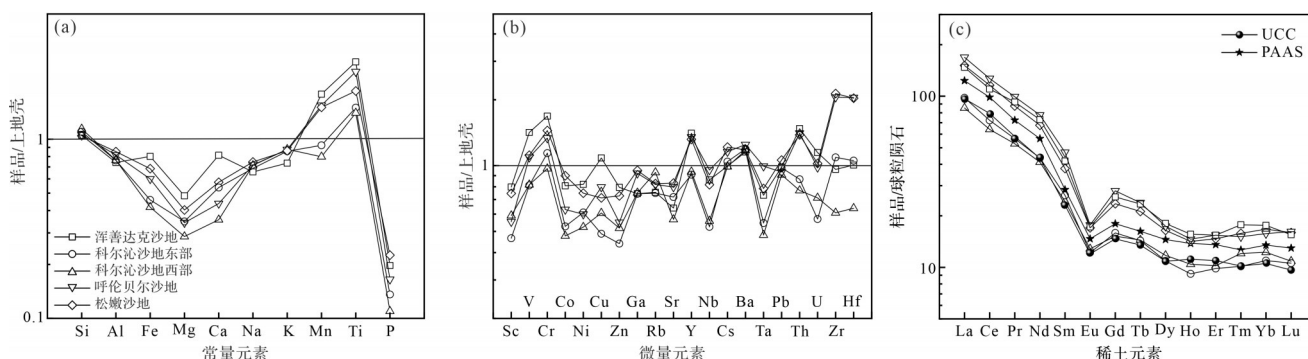


图3 东北沙地沉积物的元素标准化模式图解

(a) 常量元素分配模式图; (b) 微量元素分配模式图; (c) 稀土元素分配模式图

Fig.3 Normalized patterns for elements in the Northeast sandy land sediments

(a) major elements; (b) trace elements; (c) rare earth elements

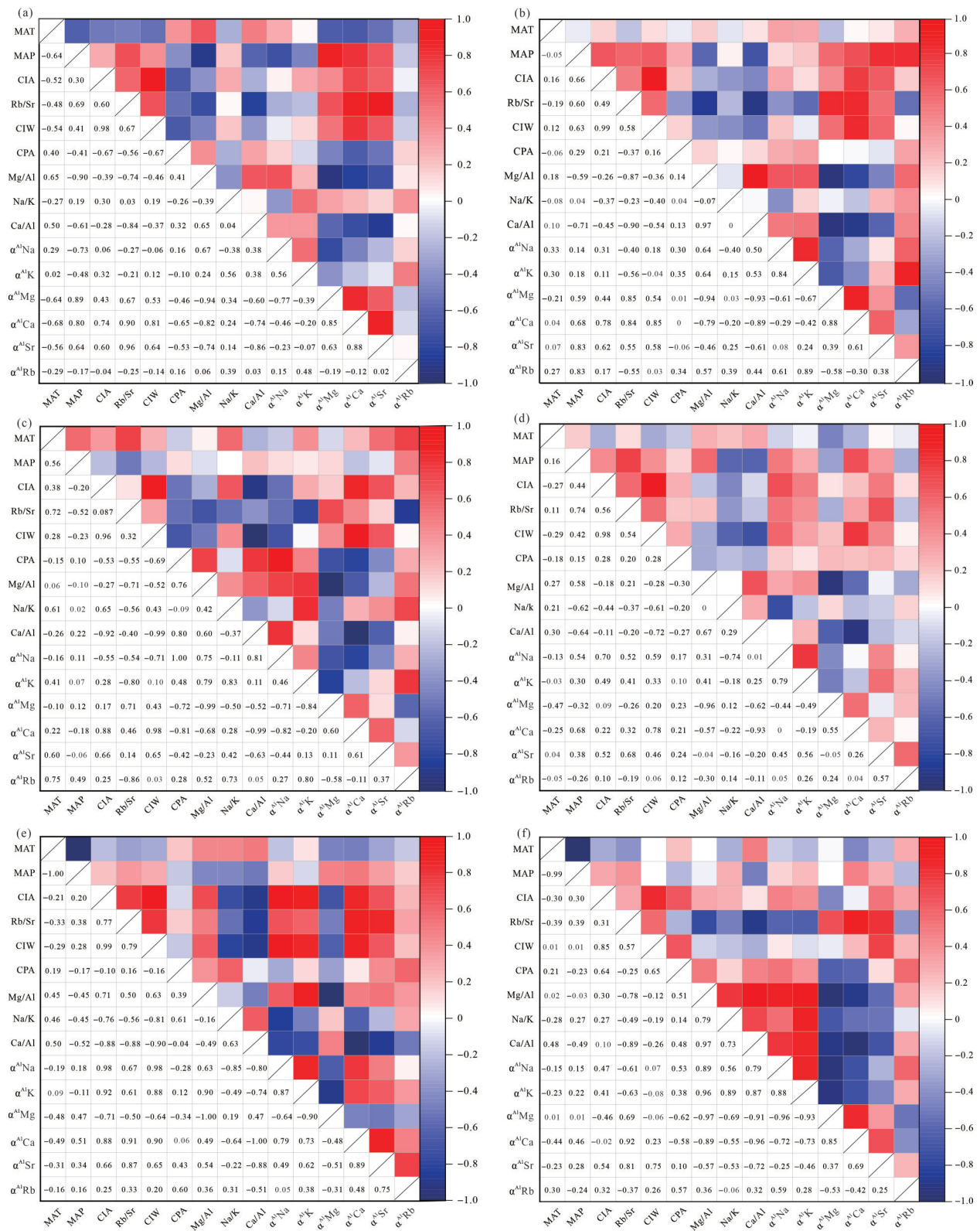


图4 东北沙地风成砂、河流砂风化指数与温度、降水量相关性系数指示图

(a) 浑善达克沙地; (b) 科尔沁沙地东部风成砂; (c) 科尔沁沙地西部风成砂; (d) 松嫩沙地; (e) 呼伦贝尔沙地风成砂; (f) 呼伦贝尔沙地河流砂

Fig.4 Correlation coefficient between wind induced sand and fluvial sand weathering indices, temperature, and precipitation in the Northeast sandy land

(a) Hunshandake sandy land; (b) aeolian sand in the east of Horqin sandy land; (c) aeolian sand in the west of Horqin sandy land; (d) Songnen sandy land; (e) Hulanbair sandland aeolian sand; (f) Hulanbair sandland fluvial sand

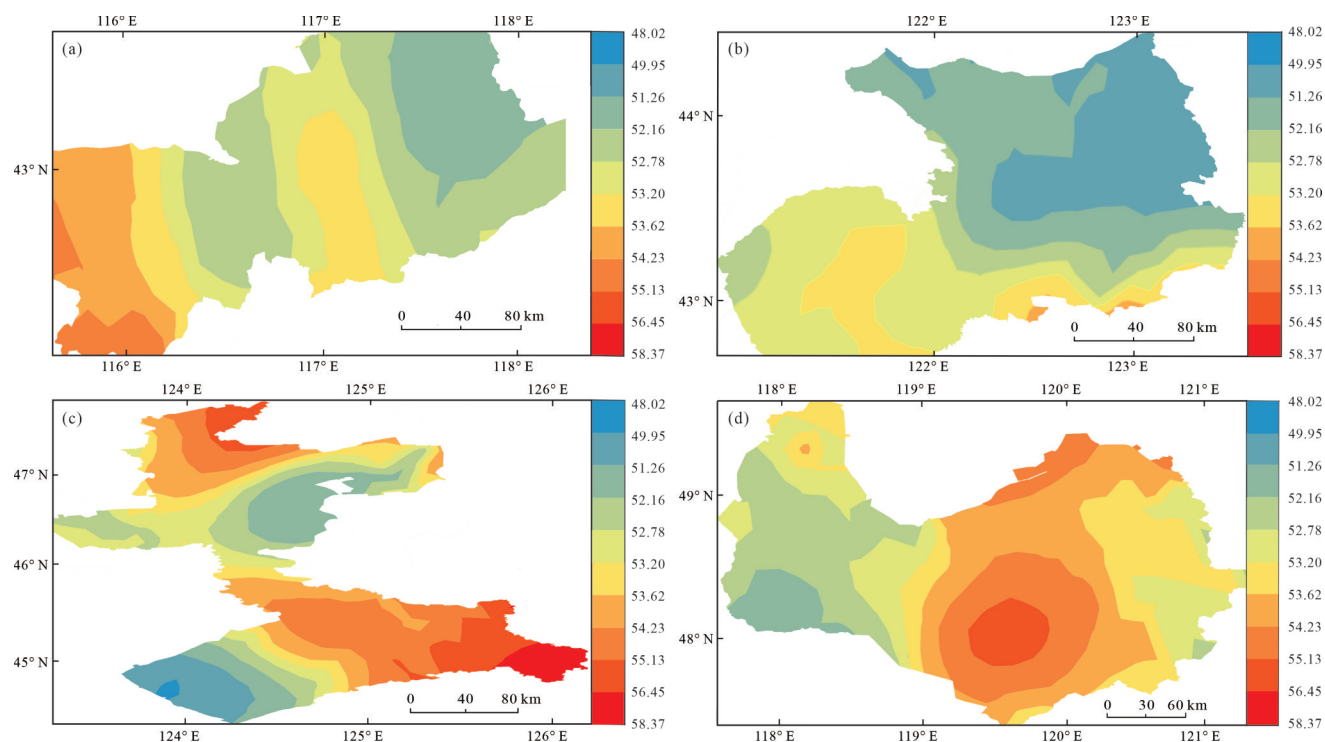


图5 东北沙地 CIA 空间分布特征图

(a) 浑善达克沙地; (b) 科尔沁沙地; (c) 松嫩沙地; (d) 呼伦贝尔沙地

Fig.5 CIA spatial distribution characteristics in the Northeast sandy land

(a) Hunshandake sandy land; (b) Horqin sandy land; (c) Songnen sandy land; (d) Hulunbuir sandy land

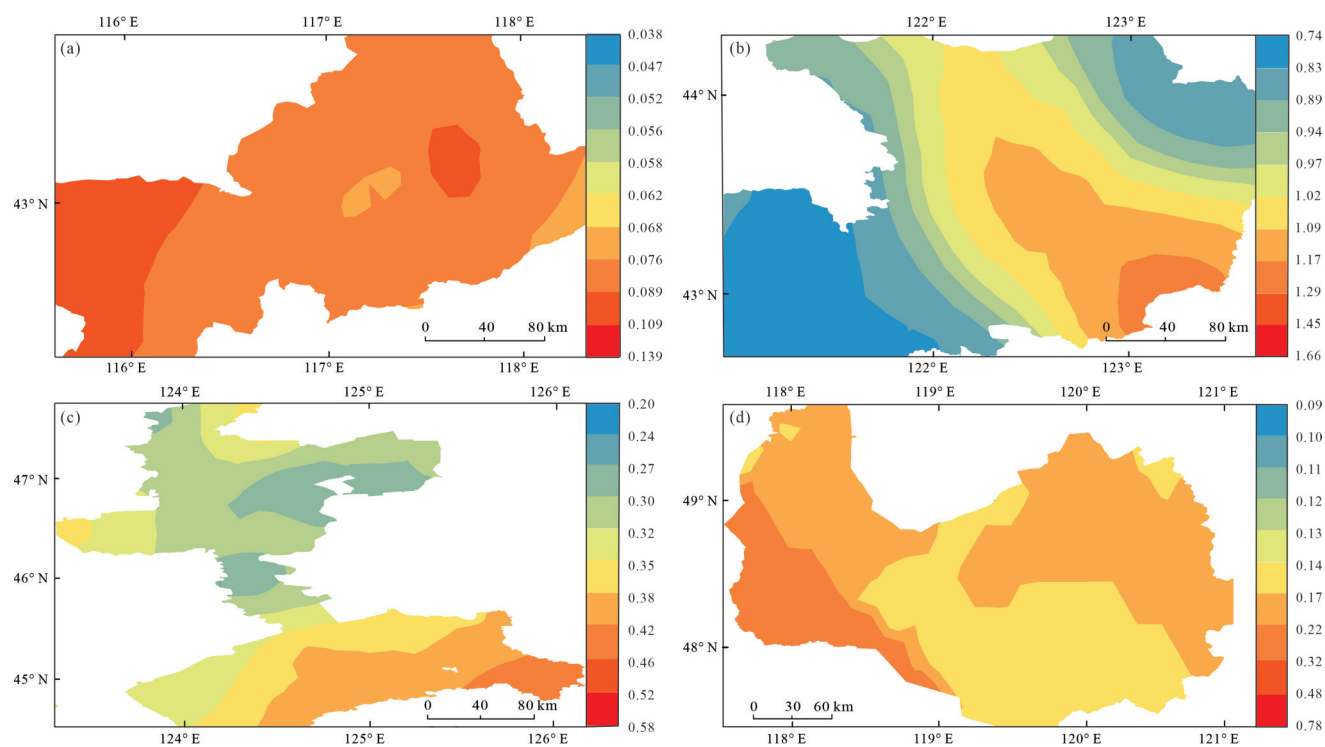


图6 东北沙地化学风化空间分布特征图

(a) 浑善达克沙地(Mg/Al); (b) 科尔沁沙地(α^A Rb); (c) 松嫩沙地(Rb/Sr); (d) 呼伦贝尔沙地(Ca/Al)

Fig.6 Spatial distribution characteristics of chemical weathering in the Northeast sandy land

(a) Hunshandake sandy land (Mg/Al); (b) Horqin sandy land (α^A Rb); (c) Songnen sandy land (Rb/Sr); (d) Hulunbuir sandy land (Ca/Al)

呼伦贝尔沙地化学风化与温度、降水量整体上呈中等相关水平。为避免风成砂与河流砂混合后对化学风化产生影响,分别将呼伦贝尔沙地风成砂和河流砂的风化指标与气候进行相关性分析,结果仍呈现中等相关性,因此可较大程度地排除风成砂与河流砂混合对沙地化学风化作用产生的影响。进而选择整体相关性较高的Ca/Al值,来表征呼伦贝尔沙地化学风化强度的空间分布特征。结果表明,呼伦贝尔沙地中,Ca/Al比值呈现三端元特征。沙地西南部的Ca/Al比值相对较高(0.22~0.32),其次为中东部和西北地区(0.17~0.22),最低值区(0.14~0.17)位于中部、西北以及东北边缘。 Ca^{2+} 的化学性质活泼,容易发生淋失,导致Ca/Al比值与风化程度呈负相关。因此,呼伦贝尔沙地中部风化作用最强,两侧较低;东部风化较西部风化强烈(图6d)。

综上所述,四个沙地的化学风化强度与气候因子的相关性存在显著差异,表明各沙地风化强度的控制因素有所不同(图4)。浑善达克沙地中,Rb/Sr、Mg/Al、Ca/Al、 $\alpha^{\text{Al}}\text{Na}$ 、 $\alpha^{\text{Al}}\text{Mg}$ 、 $\alpha^{\text{Al}}\text{Ca}$ 、 $\alpha^{\text{Al}}\text{Sr}$ 等风化指标与降水量具有强相关性;科尔沁沙地东部风成砂中,Rb/Sr、Mg/Al、Ca/Al、 $\alpha^{\text{Al}}\text{Mg}$ 、 $\alpha^{\text{Al}}\text{Ca}$ 、 $\alpha^{\text{Al}}\text{Sr}$ 、 $\alpha^{\text{Al}}\text{Rb}$ 等风化指标与降水具有强相关性,而西部风成砂中,Rb/Sr、Na/K、 $\alpha^{\text{Al}}\text{Sr}$ 、 $\alpha^{\text{Al}}\text{Rb}$ 等风化指标与温度具有强相关性;松嫩沙地中,Rb/Sr、Mg/Al、Na/K、Ca/Al、 $\alpha^{\text{Al}}\text{Ca}$ 等风化指标与降水呈强相关;呼伦贝尔沙地中,Mg/Al、Na/K、Ca/Al、 $\alpha^{\text{Al}}\text{Mg}$ 、 $\alpha^{\text{Al}}\text{Ca}$ 等风化指标均与温度、降水呈中等相关水平(图4)。由此可见,不同风化指标在不同沙地中对气候的敏感性存在差异,应单独讨论四个沙地化学风化强度的控制因素。

4.2 东北沙地化学风化的控制因素

4.2.1 浑善达克沙地

浑善达克沙地的多个风化指标均与降水因子拟合关系较好(图4a),表明该沙地化学风化作用主要受降水量控制。前人的一些研究中同样提出了降水增加时陆表化学风化作用会增强^[43-44],反之亦然。相比于其他三个沙地,浑善达克沙地位于干旱区腹地,水汽输送较为有限且降水相对较少。然而,源于克什克腾旗西南部的西拉木伦河^[45]可以为沙地提供丰富的水源。此外,沙地中分布着众多的小湖、水泡子和沙泉^[46]同样可以为沙地提供水源。相较于东亚夏季风带来的稀少降水而言,沙地的风化程度更加依赖河流的水汽输送,这也是引起浑善达克沙地化学

风化作用发生的主要原因。另外浑善达克沙地的植被覆盖率在逐年增加,现已超过85%^[47]。较高的植被覆盖度使沙地荒漠化程度持续减少,这很大程度上也加强了化学风化作用。综上所述,相比于温度对风化作用的微弱影响,浑善达克沙地的化学风化强度与降水量的相关性更高,尤其是河流作用对沙地风化强度的影响最为关键。

4.2.2 科尔沁沙地

科尔沁沙地东、西部的化学风化强度及其影响因素具有明显的空间异质性,表现为沙地东部风化强度主要受降水影响(图4b),而西部风化强度却与温度密切相关(图4c)。究其原因,可能与沙地东、西部地形地势有关,导致不同区域的温度和降水量存在差异。科尔沁沙地整体上自西向东倾斜,多为西北—东南走向的沙丘^[48],西部发育贯穿沙地的西拉木伦河等大小多条河流。由于大兴安岭山地起伏较大、坡度较陡,地表径流流速快,流水与风成砂的接触时间短,削弱了河流作用对化学风化的影响。同时,沙地西部临近内蒙古高原(图1),深居内陆,大气降水量相对较少导致降水作用对化学风化作用影响微弱。另外,地形的限制作用导致水分减少,科尔沁沙地的植被覆盖率较低,这间接地不利于促进化学风化作用的发生^[49]。反之,沙地西部年平均温度较东部地区高(图2),高温有助于促进岩石中矿物质的溶解,加快化学反应速率^[50]。因此,相比于降水,温度成为影响科尔沁沙地西部化学风化强度的主要因素。

科尔沁沙地东部的地势平缓,以平原为主(图1),又因靠近西辽河流域,河流流经时风成砂与水分接触时间长,湿度增大,因此易于发生化学风化作用。另外,科尔沁沙地夏季受大陆低气压和副热带高压控制,盛行西南风^[31,50],属于半湿润季风气候区(图1)。季风向沙地东部输送了大量的水汽,加速了风成砂化学风化作用的发生。随着风化作用的增强,沉积物的 $\alpha^{\text{Al}}\text{E}$ 值会显著增大^[39]。科尔沁沙地风成砂的元素迁移水平显示为 $\alpha^{\text{Al}}\text{Mg} > \alpha^{\text{Al}}\text{Ca} > \alpha^{\text{Al}}\text{Sr} > \alpha^{\text{Al}}\text{Na} > \alpha^{\text{Al}}\text{Rb} > \alpha^{\text{Al}}\text{K}$ (图7),沙地东部迁移水平较高的元素如 $\alpha^{\text{Al}}\text{Mg}$ ($R=0.59$)、 $\alpha^{\text{Al}}\text{Ca}$ ($R=0.68$)、 $\alpha^{\text{Al}}\text{Sr}$ ($R=0.83$)均与降水相关性好(图4b),其中 $\alpha^{\text{Al}}\text{Sr}$ 与降水的相关性最为显著,进一步证实了降水是影响沙地东部化学风化强度的关键因素。

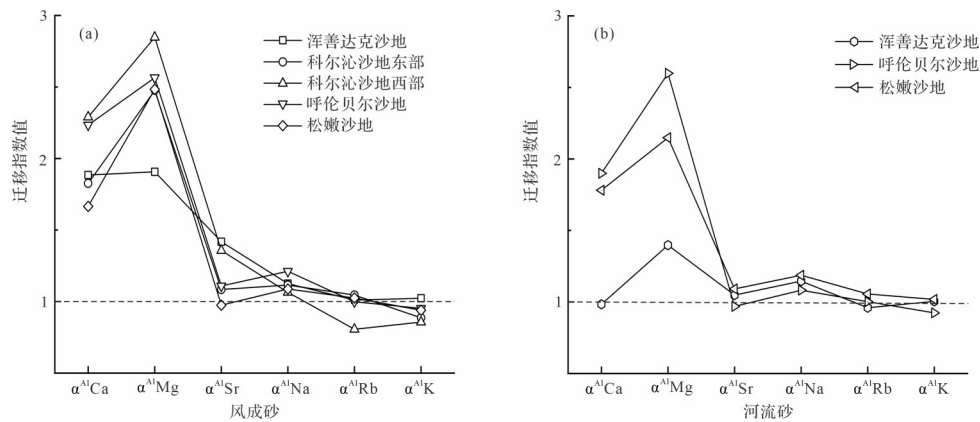


图7 东北沙地迁移指数

(a)风成砂;(b)河流砂

Fig.7 $\alpha^{Al}E$ indices from the Northeast sandy land

(a) aeolian sand; (b) fluvial sand

4.2.3 松嫩沙地

松嫩沙地的多个化学风化指标均与降水量显著相关(图4d),表明其化学风化强度主要受降水量的影响。松嫩沙地位于松嫩平原腹地,在松嫩古湖消亡后发育而成^[51],因此其形成可能主要受降水影响,实验分析结果也证实了这一点。此外,降水量是地表水循环的重要来源,对水分供应起着关键作用^[52]。松嫩沙地地处温带季风气候区,夏季降水丰沛,且沙地内部发育多条河流(如嫩江、松花江、第二松花江等)(图1),大气降水和地表流水均为沙地的化学风化过程提供了充分的水源。沙地中的易溶组分随着地表河流与地下水循环迁移,有效地促进了沙地的化学风化过程。另外,充足的水源使得沙地的植被覆盖率增加,植物产生的有机酸不仅有助于岩石的分解,而且还通过淋溶不稳定的化学元素进一步增强了化学风化程度。综上所述,区域地理位置的特征、丰沛的大气降水、河流提供的充足水源以及高植被覆盖率等因素共同影响降水并控制了松嫩沙地的化学风化强度。

4.2.4 呼伦贝尔沙地

呼伦贝尔沙地的化学风化强度虽然一定程度上受温度和降水量的影响,但是影响程度均相对较弱(图4e,f)。从地理位置看,呼伦贝尔沙地位于中高纬度地带的欧亚大陆东南端,属于温带大陆性季风气候区(图1)。由于大兴安岭山脉的阻隔和纬度偏高等原因(图1),来自太平洋的东南季风较难深入^[53],沙地的降水量较少,对风化作用的影响较弱。另一方面,呼伦贝尔沙地处于对时间尺度上变化具有较

高敏感性的季风区边缘地带,东亚夏季风强度的变化对洪涝和严重干旱的发生均有直接影响^[54],导致呼伦贝尔沙地的温度与降水量在时间和空间上整体分布不均匀,无法对沉积物的化学风化产生长期且显著的影响。

研究显示,呼伦贝尔沙地近代因经历严重的风蚀出现大范围固定沙丘活化和草场沙化,形成大量地表风蚀坑^[55],表明沙地的风速较高且常年受到强风的侵蚀作用。在很大程度上强风可能会带走风化产物和表层土壤,使得风化产物较难在地表保存,进而减少化学风化产物在地表的滞留时间,因此温度和降水量对风化的影响难以持续和积累。此外,强风在一定程度上强化了物理风化作用(如风蚀和磨蚀)的影响,抑制了化学风化作用的发生。同时,较高的地表植被覆盖度使得地表沉积物暴露面积小,也在一定程度上减弱了气候因子(温度、降水量)对化学风化作用的影响。总体来看,呼伦贝尔沙地风成砂和河流砂的化学风化强度与温度和降水量的相关性较弱,主要受地形的限制作用、风化产物的运移、物理风化作用以及植被覆盖度等因素的影响。

综上所述,东北沙地化学风化强度的控制因素远比想象中更加复杂,温度和降水等气候因素不同程度地影响着沙地的风化强度,也是控制沙地发育和演化的主导因素。此外,河流作用、地形地貌、植被覆盖率等因素通过影响降水或温度的变化,进而对沙地化学风化的发生起到至关重要的作用。

针对沙地化学风化强度反馈的与气候因子之间的关系,研究认为现代沙地的治理应该依据气候特

征针对性进行沙地环境治理。首先对于受降水因子影响较大的沙地(如浑善达克沙地、松嫩沙地和科尔沁沙地东部地区)可以相应地增加水利设施的建设、优化水资源的配置,同时种植耐盐、耐旱作物,增加沙地的固沙能力以防止风沙侵蚀;其次对于受温度因子影响较大的沙地(如科尔沁沙地西部)可以采取相应防火措施以避免沙地退化,同时种植耐寒、抗风植物以增强沙地的抗寒能力;最后对于受气候影响微弱的沙地(如呼伦贝尔沙地)可以充分利用资源禀赋,发展特色产业以提高经济效益,同时加强对沙地的监测和管理,维护好沙地的生态环境。

5 结论

(1) 东北沙地的化学风化强度大部分处于较低等化学风化,风化高值的分布范围较小且不同沙地风化的空间分布特征存在差别:科尔沁沙地和松嫩沙地风化的空间特征具有明显的递减规律,浑善达克沙地和呼伦贝尔沙地风化的空间分布特征存在区域差异。使用不同风化指标能够较好地表达化学风化特征这一观点表明,不同指标在不同区域内(大空间尺度)的敏感程度具有差异。因此,利用同一指标度量大空间尺度的化学风化程度时需要谨慎。

(2) 浑善达克沙地和松嫩沙地整体上化学风化强度均与降水密切相关;科尔沁沙地东、西部化学风化的影响因素存在差异,沙地东部化学风化强度与降水相关,沙地西部化学风化强度与温度相关;呼伦贝尔沙地的化学风化强度受温度和降水等气候因子的影响较微弱,可能是其他非气候因素(如地形、风蚀、物理风化和地表植被覆盖等)减弱了气候对化学风化的影响。

(3) 根据各沙地气候影响机制的差异,理应有针对性地开展沙地防治工作。一方面可以优化水资源的配置,种植耐盐、耐旱作物,防止风沙侵蚀;另一方面可以采取相应措施以避免沙地退化。在维护沙地的生态环境的同时,发展绿色产业以提高沙地的社会和经济效益。

致谢 地球化学组成分析得到中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室黄俊华研究员的大力支持,在此表示感谢!对提供宝贵修改意见的评审专家,一并谨致谢忱。感谢辛勤付出的编辑部老师,使论文得以完善。

参考文献(References)

- [1] Laity J. Deserts and desert environments[M]. Hoboken: Wiley, 2008.
- [2] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社, 1985. [Liu Tung-sheng. Loess and environments[M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [3] Wang X M, Geng X, Liu B, et al. Desert ecosystems in China: Past, present, and future[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 234: 104206.
- [4] Zhao S, Xia D S, Jin H L, et al. A multi-proxy Late Holocene climate record from aeolian deposits of the Horqin sandy land, Northeast China and its societal implications[J]. Aeolian Research, 2018, 35: 29-38.
- [5] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D23): 28041-28047.
- [6] 陈骏, 刘连文, 季峻峰, 等. 最近 2.5 Ma 以来黄土高原风尘化学组成的变化与亚洲内陆的化学风化[J]. 中国科学:地球科学, 2001, 31(2): 136-145. [Chen Jun, Liu Lianwen, Ji Junfeng, et al. Changes in the chemical composition of wind and dust on the Loess Plateau and chemical weathering in inland Asia since the last 2.5 Ma[J]. Science China Earth Sciences, 2001, 31(2): 136-145.]
- [7] Maher B A. The magnetic properties of Quaternary aeolian dusts and sediments, and their palaeoclimatic significance[J]. Aeolian Research, 2011, 3(2): 87-144.
- [8] Walker J C G, Hays P B, Kasting J F. A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1981, 86(C10): 9776-9782.
- [9] Mei H W, Jian X, Zhang W, et al. Behavioral differences between weathering and pedogenesis in a subtropical humid granitic terrain: Implications for chemical weathering intensity evaluation[J]. Catena, 2021, 203: 105368.
- [10] Qiu S F, Zhu Z Y, Yang T, et al. Chemical weathering of monsoonal eastern China: Implications from major elements of topsoil[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 81: 77-90.
- [11] Brady P V, Carroll S A. Direct effects of CO₂ and temperature on silicate weathering: Possible implications for climate control[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(7): 1853-1856.
- [12] Dessert C, Dupré B, Gaillardet J, et al. Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle[J]. Chemical Geology, 2003, 202(3/4): 257-273.
- [13] Adams J S, Kraus M J, Wing S L. Evaluating the use of weathering indices for determining mean annual precipitation in the ancient stratigraphic record[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2011, 309(3/4): 358-366.

- [14] Wang T H, Wang Q B, Han C L, et al. Development and application of new transfer functions between climate and soil weathering indices for paleoclimatic reconstructions from Chinese loess-paleosol sections[J]. *Catena*, 2023, 224: 106974.
- [15] Yang S Y, Li C X, Cai J G. Geochemical compositions of core sediments in eastern China: Implication for Late Cenozoic palaeoenvironmental changes[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 229(4): 287-302.
- [16] Fu H J, Jian X, Liang H H, et al. Tectonic and climatic forcing of chemical weathering intensity in the northeastern Tibetan Plateau since the Middle Miocene[J]. *Catena*, 2022, 208: 105785.
- [17] Zhang W X, Zhang H C, Niu J, et al. Geochemical record of rapid climate change and chemical weathering in a semi-arid area, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Geosciences Journal*, 2020, 24(6): 723-732.
- [18] Zhu B Q, Yang X P. Chemical weathering of detrital sediments in the Taklamakan Desert, northwestern China[J]. *Geographical Research*, 2009, 47(1): 57-70.
- [19] Bao J, Song C H, Yang Y B, et al. Reduced chemical weathering intensity in the Qaidam Basin (NE Tibetan Plateau) during the Late Cenozoic[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 170: 155-165.
- [20] 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.
- [21] Li B F, Feng Q, Li Z J, et al. Geochemical characteristics of surface aeolian sand in the Badain Jaran Desert, northwestern China: Implications for weathering, sedimentary processes and provenance[J]. *Catena*, 2022, 219: 106640.
- [22] Feng M Y, Lü T Y, Sun J M, et al. Optically stimulated luminescence dating and paleoclimatic implications of the Holocene dune sands in the Hunshandake sandy land, Northeast China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2023, 615: 111469.
- [23] Chen B, Yang X P, Jiang Q D, et al. Geochemistry of aeolian sand in the Taklamakan Desert and Horqin sandy land, northern China: Implications for weathering, recycling, and provenance[J]. *Catena*, 2022, 208: 105769.
- [24] Wang J Y, Gao G Z, Jie D M, et al. Aeolian soils on the eastern side of the Horqin sandy land, China: A provenance and sedimentary environment reconstruction perspective[J]. *Catena*, 2022, 210: 105945.
- [25] Lv C J, Li X S, Han Z Y, et al. Fluvial response to precipitation variations since 36 ka in the Hunshandake sandy land in North China[J]. *Geomorphology*, 2018, 317: 128-138.
- [26] 赵延卓, 谢远云, 康春国, 等. 呼伦贝尔沙地风成砂—古土壤剖面记录的全新世气候变化[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(5): 85-96. [Zhao Yanzhuo, Xie Yuanyun, Kang Chunguo, et al. Holocene climate change recorded by paleosol profile in Hulun Buir sandy land[J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(5): 85-96.]
- [27] Xie Y Y, Liu L, Kang C G, et al. Sr-Nd isotopic characteristics of the Northeast sandy land, China and their implications for tracing sources of regional dust[J]. *Catena*, 2020, 184: 104303.
- [28] Xie Y Y, Yuan F, Zhan T, et al. Geochemical and isotopic characteristics of sediments for the Hulun Buir sandy land, Northeast China: Implication for weathering, recycling and dust provenance[J]. *Catena*, 2018, 160: 170-184.
- [29] 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.]
- [30] Liu Z T, Yang X P. Geochemical-geomorphological evidence for the provenance of aeolian sands and sedimentary environments in the Hunshandake sandy land, eastern Inner Mongolia, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2013, 87(3): 871-884.
- [31] Wu P, Xie Y Y, Kang C G, et al. Quantitative reconstruction of competing sources reveals spatial heterogeneity and complex aeolian-fluvial interactions in the Horqin sandy land, NE China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2023, 48(14): 2772-2787.
- [32] 谢远云, 孙磊, 康春国, 等. 松嫩沙地 Sr-Nd 同位素组成特征[J]. *沉积学报*, 2020, 38(4): 771-780. [Xie Yuanyun, Sun Lei, Kang Chunguo, et al. Sr-Nd isotopic partition characteristics of the Songnen sandy land[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(4): 771-780.]
- [33] 赵倩, 谢远云, 郝冬梅, 等. 松嫩平原中更新世以来气候干旱化: 来自哈尔滨黄土记录[J]. *沉积学报*, 2022, 40(6): 1702-1717. [Zhao Qian, Xie Yuanyun, Hao Dongmei, et al. Climatic aridification in Songnen Plain since the Middle Pleistocene from Harbin loess records[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(6): 1702-1717.]
- [34] 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.]
- [35] 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, 10(4): 539-544. [Feng Lianjun, Chu Xuelei, Zhang Qirui, et al. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(4): 539-544.]
- [36] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Na-*

- ture, 1982, 299(5885): 715-717.
- [37] An Z S, Clemens S C, Shen J, et al. Glacial-interglacial Indian summer monsoon dynamics[J]. *Science*, 2011, 333(6043): 719-723.
- [38] Buggle B, Glaser B, Hambach U, et al. An evaluation of geochemical weathering indices in loess-paleosol studies[J]. *Quaternary International*, 2011, 240(1/2): 12-21.
- [39] Garzanti E, Vermeesch P, Andò S, et al. Provenance and recycling of Arabian desert sand[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 120: 1-19.
- [40] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. London: Blackwell, 1985: 312.
- [41] 江文剑, 秦明宽, 范洪海, 等. 松辽盆地西南部含铀岩系沉积时的古气候演变及其与铀成矿关系[J]. *地球科学*, 2023, 48(3): 1232-1245. [Jiang Wenjian, Qin Mingkuan, Fan Honghai, et al. Paleoclimate evolution and uranium mineralization during the deposition of uranium-bearing rocks in the southwest of Songliao Basin[J]. *Earth Science*, 2023, 48(3): 1232-1245.]
- [42] Jin H L, Wan S M, Liu C, et al. Evolution of silicate weathering in South China since 30 Ma: Controlling factors and global implications[J]. *Global and Planetary Change*, 2023, 223: 104095.
- [43] 孙天琪, 徐兆凯, 常凤鸣, 等. 中新世澳大利亚西南部气候演化过程及其主要控制因素[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(8): 1577-1590. [Sun Tianqi, Xu Zhaokai, Chang Fengming, et al. Climate evolution of southwest Australia in the Miocene and its main controlling factors[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 52(8): 1577-1590.]
- [44] Li G J, Ji J F, Zhao L, et al. Response of silicate weathering to monsoon changes on the Chinese Loess Plateau[J]. *Catena*, 2008, 72(3): 405-412.
- [45] 谢静, 吴福元, 丁仲礼. 浑善达克沙地的碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成及其源区意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 523-528. [Xie Jing, Wu Fuyuan, Ding Zhongli. Detrital zircon composition of U-Pb ages and Hf isotope of the Hunshandake sandland and implications for its provenance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 523-528.]
- [46] 白美兰, 郝润全. 气候变化对浑善达克沙地生态环境演变的影响[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(3): 484-488. [Bai Meilan, Hao Runquan. Impact of climatic variation on ecological environmental evolution in hunshandake sandland[J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(3): 484-488.]
- [47] 亓玉昆. 加强生态保护 推动绿色转型[N]. *人民日报*, 2023-10-12(18). [Qi Yukun. Strengthening ecological protection and promoting green transformation[N]. *People's Daily*, 2023-10-12(18).]
- [48] 朱迎新. 章古台沙地樟子松人工林固沙效果探究[J]. *理论界*, 2014(5): 62-64. [Zhu Yingxin. Study on the effect of sand fixation in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in Zhanggutai sandy land[J]. *Theory Horizon*, 2014(5): 62-64.]
- [49] 杨晓君, 刘廷玺, 王冠丽, 等. 科尔沁沙地流动沙丘不同时空尺度水热变化及 CO₂ 交换特征[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 1989-1998. [Yang Xiaojun, Liu Tingxi, Wang Guanli, et al. Characteristics of humidity and temperature variations and CO₂ exchange of mobile dunes at different space-time scales in Horqin sandy land, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(6): 1989-1998.]
- [50] 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.
- [51] 马永法, 詹涛, 杨业, 等. 东北平原东部天恒山钻孔色度变化特征与古气候意义及对松嫩古湖演化的指示[J]. *地质学报*, 2021, 95(11): 3519-3531. [Ma Yongfa, Zhan Tao, Yang Ye, et al. The indication of chroma characteristics and its palaeoclimatic significance in the Tianhengshan(THS) core from the eastern part of the Northeast China Plain to the evolution of Songnen paleo-lake[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(11): 3519-3531.]
- [52] Mariotti A, Zeng N, Yoon J H, et al. Mediterranean water cycle changes: Transition to drier 21st century conditions in observations and CMIP3 simulations[J]. *Environmental Research Letters*, 2008, 3(4): 044001.
- [53] Wang Y B, Liu X Q, Herzschuh U. Asynchronous evolution of the Indian and East Asian summer monsoon indicated by Holocene moisture patterns in monsoonal Central Asia[J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 103(3/4): 135-153.
- [54] Yang B, Kang S Y, Ljungqvist F C, et al. Drought variability at the northern fringe of the Asian summer monsoon region over the past millennia[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 43(3/4): 845-859.
- [55] Dong Z B, Wang X M, Liu L Y. Wind erosion in arid and semiarid China: An overview[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 55(4): 439-439. .

Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chemical Weathering Intensity for Sandy Land in Northeast China

ZHAO WanTing¹, WANG YanRu^{1,2}, XIE YuanYun^{1,2}, CHI YunPing^{1,2}, KANG ChunGuo³,
WANG YeHui¹, WU Peng¹, SUN Lei¹, WEI ZhenYu¹, LIU HaiJin¹

1. College of Geographic Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

2. Heilongjiang Province Key Laboratory of Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Service in Cold Regions, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

3. Department of Geography, Harbin University, Harbin 150086, China

Abstract: [Objective] Chemical weathering is a key geological process that regulates the long-term climate of the Earth and participates in the global carbon cycle. It plays a key role in the evolution of terrestrial climate and paleo-climate reconstruction, shaping the surface morphology and sustaining life. [Methods] The chemical weathering characteristics of fine particle components ($<63\ \mu\text{m}$) of 89 aeolian and fluvial sand samples from four major sandy lands in Northeast China (Hunshandake sandy land, Horqin sandy land, Songnen sandy land, and Hulunbuir sandy land) were analyzed to reveal the spatial distribution characteristics of chemical weathering in the Northeast sandy land. To evaluate the correlation between 13 different weathering indices and climate factors (annual average temperature and precipitation) and the main influencing factors controlling the chemical weathering degree of the Northeast sandy land. [Results] The results showed that when the same chemical weathering index (such as Chemical Index of Alteration, CIA) was used to reconstruct the chemical weathering characteristics of sandy land, the spatial distribution of different sandy lands was poor, the correlation between the same weathering index and climate factors was poor ($r \leq 0.4$, $p > 0.05$). However, different weathering indices showed clear spatial distribution rules when reconstructing the distribution characteristics of chemical weathering in the Northeast sandy land, and the correlation with climate factors was better in different sandy lands ($r \geq 0.6$, $p \leq 0.05$), indicating that different weathering indices had different sensitivities to climate in different regions. Therefore, the chemical weathering measured by different indices in the Northeast sandy land is controlled by climate factors, but the correlation between chemical weathering intensity and temperature and precipitation of different sandy lands is still significantly different. In general, most of the chemical weathering areas reconstructed with different indices in the Northeast sandy land are in a low chemical weathering intensity, and the distribution range of chemical weathering high value is small, and there are clear spatial distribution characteristics. The intensity of chemical weathering in Hunshandake sandy land, eastern Horqin sandy land and Songnen sandy land is affected by precipitation factors. The temperature and precipitation changes are influenced by fluvial action, monsoon precipitation, geographical location, and vegetation coverage, which indirectly affect the occurrence of chemical weathering. The chemical weathering intensity in the west Horqin sandy land is mainly affected by temperature factors and controlled by terrain and higher average annual temperature. The chemical weathering intensity of Hulunbuir sandy land is weakly affected by temperature and precipitation factors, and non-climatic factors (such as terrain, wind erosion, physical weathering, and vegetation coverage) may weaken the influence of climate on chemical weathering. [Conclusions] In summary, the degree of chemical weathering in the Northeast sandy land is mainly controlled by climatic conditions (temperature and precipitation), but the sensitivity of chemical weathering represented by different chemical weathering indices to climate is significantly different in different sandy lands. Therefore, careful choices should be made when using chemical weathering indices of sediments for paleo-climate and paleo-climate reconstruction.

Key words: Northeast sandy land; chemical weathering intensity; climate; spatial distribution; correlation analysis