

doi: 10.12029/gc20210607002

刘建宇, 聂洪峰, 宋保芳, 肖春蕾, 袁国礼, 尚博譔, 潘震. 2024. 内蒙古阴山北麓的风蚀沙化作用及其生态地质效应[J]. 中国地质, 51(3): 1020–1033.

Liu Jianyu, Nie Hongfeng, Song Baofang, Xiao Chunlei, Yuan Guoli, Shang Boxuan, Pan Zhen. 2024. Wind erosion, land desertification and ecogeological effects in the northern piedmont of Yinshan Mountain in Inner Mongolia[J]. Geology in China, 51(3): 1020–1033(in Chinese with English abstract).

## 内蒙古阴山北麓的风蚀沙化作用及其生态地质效应

刘建宇<sup>1</sup>, 聂洪峰<sup>1</sup>, 宋保芳<sup>2</sup>, 肖春蕾<sup>3</sup>, 袁国礼<sup>2</sup>, 尚博譔<sup>1</sup>, 潘震<sup>2</sup>

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

**摘要:**【研究目的】阴山北麓作为我国土地沙化最严重的区域之一, 受风蚀作用影响严重。本文通过研究该地区风蚀作用、土地荒漠化与植被类型分布三者之间的关系, 阐明风蚀作用对基岩风化成土过程的影响, 揭示风蚀对土地沙化的影响, 诠释生态地质特征与生态系统的耦合关系, 为干旱、半干旱地区生态系统保护修复提供科学依据。

【研究方法】本文选择该地区缓坡丘陵、低山丘陵和中山三种地貌区的基岩风化剖面为研究对象, 对比研究了不同风蚀强度下岩石风化过程中元素的迁移过程、土壤质地特征以及地表植被类型与覆盖度变化规律。【研究结果】缓坡丘陵区受风蚀作用影响较大, 细粒风化产物大量迁出, 表土  $Al_2O_3$  含量显著减少, 土壤剖面 CIA 值变化异常、厚度变薄、养分流失、保水能力下降, 植被类型以草为主, 稀疏矮小, 覆盖度较低; 低山丘陵区受风蚀作用影响较小, 黏粒、粉粒少量迁出, 少量极细砂迁入, 表土  $Al_2O_3$  含量减少, 土壤 CIA 值变化正常、厚度变化不大、养分少量流失, 植被类型以草为主, 分布相对密集, 且有低矮灌木生长; 中山区受风蚀作用影响最小, 以黏粒、粉粒物质迁入为主, 风化产物迁出甚少, 表土  $Al_2O_3$  含量增加, CIA 值显著升高, 植被类型以低矮灌木为主, 山坡上有大片乔木生长, 长势较好。【结论】强烈的风蚀作用使得阴山以北缓坡丘陵区土壤中的细粒物质被迁移至中山区, 造成缓坡丘陵区土壤厚度与质量较中山区差, 因此缓坡丘陵区植被稀疏, 土地沙化较严重, 山地区植被涨势较好。

**关键词:** 生态地质; 基岩风化; 风蚀作用; 阴山北麓; 生态地质调查工程

**创新点:** (1)通过剖面测量, 岩石、风化层、土壤主微量元素与土壤物质组成分析, 揭示了坡丘陵、低山丘陵和中山三种地貌区风化特征; (2)阐明了风蚀作用、土地荒漠化与植被类型分布三者之间的关系, 为干旱、半干旱地区生态系统保护修复提供科学依据。

中图分类号: X171.1; X141 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)03-1020-14

## Wind erosion, land desertification and ecogeological effects in the northern piedmont of Yinshan Mountain in Inner Mongolia

LIU Jianyu<sup>1</sup>, NIE Hongfeng<sup>1</sup>, SONG Baofang<sup>2</sup>, XIAO Chunlei<sup>3</sup>,  
YUAN Guoli<sup>2</sup>, SHANG Boxuan<sup>1</sup>, PAN Zhen<sup>2</sup>

(1. China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. China Institute of Geo-environment

收稿日期: 2021-06-07; 改回日期: 2021-10-16

基金项目: 中国地质调查局项目“全国地球关键带遥感地质调查项目(DD20190536)”资助。

作者简介: 刘建宇, 男, 1988 年生, 博士, 工程师, 主要从事遥感地质、生态地质方向研究; E-mail: liujy5577@163.com。

通讯作者: 聂洪峰, 男, 1964 年生, 教授级高级工程师, 主要从事水工环地质、遥感地质方向研究; E-mail: nie\_hongfeng@qq.com。

Monitoring, Beijing 100081, China)

**Abstract:** This paper is the result of ecological geological survey engineering.

**[Objective]** As one of severe desertification areas in China, the northern piedmont of Yin Mountain is seriously impacted by wind erosion. The relationship of wind erosion, land desertification and the distribution of vegetation types in this area was studied, to clarify the impact of wind erosion on the weathering process from the bedrock to the soil, to reveal the effect of wind erosion on land desertification, to interpret the coupling relationship between eco-geological characteristics and ecosystems, and to provide a scientific basis for the protection and restoration of ecosystem at arid and semi-arid regions. **[Methods]** Weathering profiles was selectively collected from rocks to soils, which distributed in the gentle slope hills, low mountain hills and mid-mountain. To compare the influence of different wind erosion intensities, some works were performed to analyze the migration processes of elements during rock weathering, characteristics of soil texture, and change patterns of surface vegetation types and its coverage. **[Results]** The gentle slope hilly area was greatly influenced by wind erosion. Many fine particles of weathering products were moved out, which appeared as the content of  $Al_2O_3$  in surface soil decreasing significantly and values of CIA in soil profile changing abnormally. Thus, the soil thickness became thinner with the soil nutrients being lost and the water retention ability be weakened. As the result, the grass is the main vegetation type with sparse distribution. The low hilly area was less affected by wind erosion. A small amount of clay and silt grains were emigrated, and some fine sands were immigrated, which appeared as the content of  $Al_2O_3$  in surface soil decreasing and values of CIA in soil profile changing normally. Thus, the soil thickness was almost unchanged with the soil nutrients being lost slightly. As the result, the vegetation type was dominated by the grass with low shrubs growing, and their distribution was relatively denser. The middle-mountain area was impacted by the wind erosion at the least degree. A certain amount of clay and silt was immigrated almost without emigration of weathering products, which appeared as the content of  $Al_2O_3$  in surface soil increased with a great increase of CIA values. As the result, the vegetation types were mainly short shrubs, and a large number of trees were densely grown on the hillside. **[Conclusions]** Intense wind erosion caused the migration of fine-grained materials in the soil from the gentle slope hills north of Yin Mountain to the mid-mountain area, which resulted in worse soil thickness and quality at the gentle slope hills while comparing to those at the mid-mountain area. Consequently, vegetation is sparse and land desertification is more severe in the gentle slope hills, while vegetation shows better growth in the mountain areas.

**Key words:** ecogeology; rock weathering; wind erosion; the northern piedmont of Yin Mountain; ecological geological survey engineering

**Highlights:** (1) By measuring profile and analyzing major and trace elements and compositions in rocks, weathering layers and soils, the weathering characteristics of three types of geomorphic areas were revealed, including the gentle slope hills, low mountain hills and mid-mountain. (2) The relationship of wind erosion, land desertification and the distribution of vegetation types was clarified, which provides a scientific basis for the protection and restoration of ecosystems at arid and semi-arid regions.

**About the first author:** LIU Jianyu, male, born in 1988, doctor, engineer, engaged in remote-sensing geology and ecological geology; E-mail: [liujy5577@163.com](mailto:liujy5577@163.com).

**About the corresponding author:** NIE Hongfeng, male, born in 1964, professor level senior engineer, engaged in hydrogeology and remote-sensing geology; E-mail: [nie\\_hongfeng@qq.com](mailto:nie_hongfeng@qq.com).

**Fund support:** Supported by the project of China Geological Survey "Remote Sensing Geological Survey of Earth Critical Zones in China" (DD20190536).

## 1 引 言

生态地质学是研究生态问题或生态现状地学机理和地质过程的交叉学科,重点研究岩石圈和其他地表圈层相互作用下的生态特征及其形成规律(Trofimov, 2013)。地表生态特征(林地、草地、湿地、沙漠等)是特定生态条件下的特征表现,是区域

气候、地质条件及其衍生的地貌条件之间耦合作用的结果(Carni et al., 2016)。

岩石风化成土过程是岩石圈和其他地表圈层相互作用的主要形式,其间发生的各种作用不断地改变着地表格局、影响着地表环境,并且为生态系统的可持续发展、地表生命系统的维持和演化提供重要的环境和物质资源(杨骏雄等, 2016)。岩石风

化土的过程中释放众多植物生长所需的营养元素,同时微量元素也由于物质的淋溶和淀积在土壤不同层位进行再分配。在山地表生带基岩层、风化层(成土母质)、土壤层、植物物质流动呈现垂向传导继承性规律(李正积,1996)。因此,不同基岩风化形成的土壤对适生植被及品质具有显著影响(简中华等,2013;孙厚云等,2020)。另一方面,由于地形地貌、土地利用类型等差异,导致土壤风化过程中元素迁移过程不尽相同(陈儒章等,2016;张坤等,2018;宋照亮等,2020)。

土壤风蚀是在以风力为主的外营力作用下,土壤颗粒发生的脱离地表、搬运和沉积的动力学过程,是导致中国北方干旱、半干旱地区土壤养分流失、土壤退化、土地荒漠化的主要原因之一(Wang et al., 2009; Yue et al., 2015; 李达净等, 2018; 赵海鹏等, 2019)。内蒙古阴山北麓地区南靠阴山山脉、北接蒙古高原,是中国北方受荒漠化威胁最严重的地区之一,也是中国生态最为脆弱的地区之一。它处在华北地区上风向,是京津地区沙尘暴天气的主要沙源地(陈正新和尉恩凤,2002)。该地区海拔相对较高,降雨量少、蒸发量大,气候干旱,风蚀作用是引起该地区土壤不断沙化、生态功能衰退的主要因素(魏洁等,2003;李晓丽等,2006)。该地区由低到高的地貌区主要植被类型分别为草、灌木和乔木,与正常的山地植被垂直分带表现出相反的变化规律。为阐明风蚀作用、土地沙化与植被空间分布之间的关系,本文重点研究阴山北麓不同地貌区基岩风化剖面中元素的迁移过程,分析风蚀作用的影响,土地沙化的原因,诠释生态地质特征与生态系统的耦合关系,以期对干旱、半干旱地区生态系统保护修复提供理论支撑。

## 2 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区中部阴山北麓固阳县—察哈尔右翼后旗一段。该地区属于中温带半干旱区,年平均气温 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,其中1月份气温最低,平均为 $-15.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,7月份气温最高,平均为 $19.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;年平均降水量为 $300\sim 400\text{ mm}$ ,6—8月份降水最多,占全年的70%;年平均蒸发量为 $2000\sim 2750\text{ mm}$ ,是降水量的8倍以上,冬季蒸发量小,春季蒸发量大。北风、西北风是该地区一年中最主要的风向,

年平均风速为 $3\sim 5\text{ m/s}$ ,风季集中在每年11月到来年的5月,其中3—5月风速最强,平均风速为 $4\sim 6\text{ m/s}$ (吴晓光,2019)。干旱的气候条件和强劲的风力作用对该地区的土壤层造成了强烈的侵蚀,地表重量较小的细粒物质在风蚀作用的影响下飞至高空,以悬移的方式随风运行;颗粒较大的物质则以跃移或滚动的方式沿地表移动。干旱、扬尘、沙尘暴是该地区最常见的自然灾害,主要集中在春季。全年风沙天数平均为 $7\sim 16$ 天,8级以上的大风天数平均为 $30\sim 70$ 天,沙尘暴天数为 $21\sim 26$ 天(周涌和汪德水,1999)。

阴山北麓地势从北向南逐渐升高,地貌类型依次为波状高原、缓坡丘陵、低山丘陵和中山,空间分布基本呈阶梯状(吴晓光,2019)。研究区内,地貌类型分为:武川县—察哈尔右翼中旗地貌类型以中山为主,平均海拔在 $1800\text{ m}$ 左右,植被类型为乔木、低矮灌木和草,植被覆盖度较高;固阳县—武川县地貌类型以低山丘陵为主,平均海拔在 $1650\text{ m}$ 左右,植被类型为草和低矮灌木,植被覆盖度有所降低,局部存在土地沙化;察哈尔右翼中旗—察哈尔右翼后旗地形相对平坦开阔,地貌类型以缓坡丘陵为主,平均海拔在 $1550\text{ m}$ 左右,植被类型以草为主,几乎没有灌木和乔木生长,植被覆盖度较低,存在土地沙化现象(图1)。

## 3 样品采集与测试方法

### 3.1 样品采集

为揭示风蚀作用下不同地貌区基岩剖面的风化特征以及与地表生态的相互关系,在本研究区阴山北麓固阳县—察哈尔右翼后旗一段,低山丘陵、中山、缓坡丘陵3种地貌类型区分别选取5、4、3共计12个具有代表性的岩石风化剖面,剖面点号自西向东分别为D01~D12。其中D01~D05均为花岗岩剖面,位于研究区西部低山丘陵区;D06~D09分别为砂岩、片麻岩、花岗岩和角闪岩剖面,位于研究区中部中山区;D10~D12均为玄武岩剖面,位于研究区东部缓坡丘陵区。具体的采样点位置见图1。

根据基岩的风化程度,将剖面从上向下依次分为土壤层、风化层和基岩层。其中土壤层为剖面顶部,由土壤构成、含少量碎石和植物根系(图2)。为

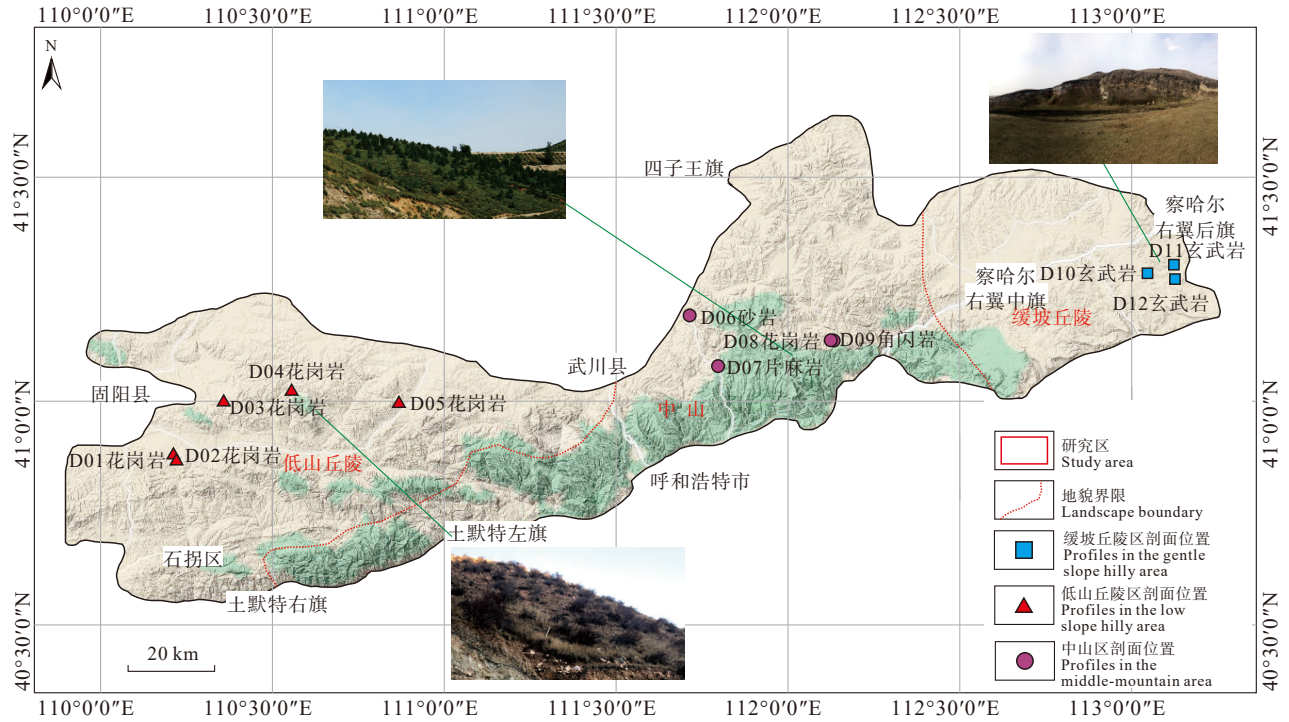


图 1 研究区及采样点位置图  
Fig.1 Location of the study area and sampling points

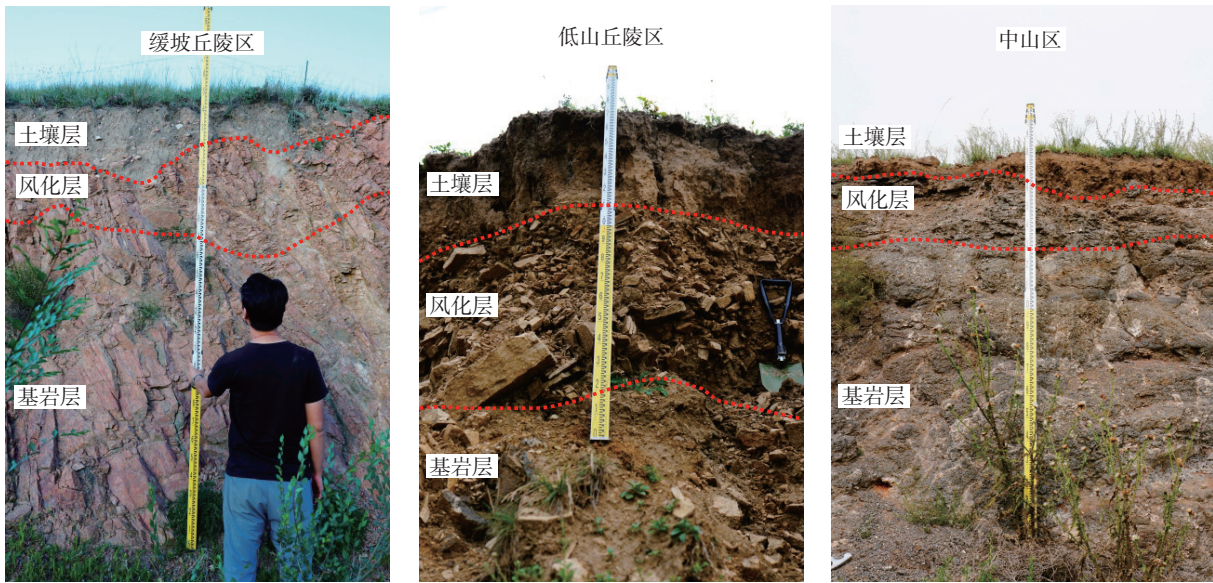


图 2 不同地貌位置采样剖面及分层  
Fig.2 Sampling profiles and stratification in different landform positions

避免外来污染, 土壤层样品采自中部, 沿同一深度采集 3 件子样品等重量混合为 1 件测试样品, 去除植物根系、碎石等杂质后至保存于干净塑封袋内并编号, 每件测试样品重量不少于 1 kg。风化层样品

同样采自层中部, 根据风化层厚度, 沿纵向间隔 30~50 cm, 采集 3~5 件子样品, 同重量混合为 1 件测试样品, 保存于布制样品袋内并编号。测试样品不过筛, 全粒径混合送样。岩石样品采自剖面底

部,在同一层位选择风化程度较低的露头,用地质锤敲打出新鲜面,采集 2~3 块基岩样品组合为 1 件测试样品,保存于布制样品袋内并编号。

## 3.2 样品测试方法

### 3.2.1 XRF 测试

常量元素  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}_T$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  用 XRF 进行测试。主要步骤如下:将样品研磨至 200 目以下,将其充分混合均匀,并用电子称称取 4.00 g 混匀的样品放入塑料环中,将少量硼酸放入塑料环外缘,将盛有样品和硼酸的塑料环置于压力机上,升压至制片压力 40 MPa,保持压力 5 s,减小压力并将其取出,样品被压成直径 4 cm 的小圆片,然后采用 X 射线荧光光谱仪进行测试。测试结果用 SuperQ 5.0 进行分析。

### 3.2.2 ICP-MS 测试

微量元素用电感耦合等离子体质谱法测定:取少量 74  $\mu\text{m}$  以下粒径的样品,放置在 105  $^\circ\text{C}$  的干燥箱中干燥 2 h,然后将样品放入磨口玻璃瓶中待用。用电子称精确称取 0.1000 g 干燥过的样品放入 50 mL 的烧杯中,加少量蒸馏水将其润湿,并加入  $\text{HNO}_3$  和  $\text{HF}$  各 10 mL 以及 2 mL  $\text{HClO}_4$ ,使其充分混合,将其放在 250  $^\circ\text{C}$  的电热板加热蒸发,从  $\text{HClO}_4$  冒白烟开始计时 3 min,时间到后取下烧杯待其冷却,再次加入  $\text{HNO}_3$  和  $\text{HF}$  各 10 mL 以及 2 mL  $\text{HClO}_4$ ,再次置于 250  $^\circ\text{C}$  的加热板上加热约 10 min,时间到后关闭电源,使其静置一夜,第二天再次打开电热板电源,加热至  $\text{HClO}_4$  不冒烟,此时将烧杯取下,并加入王水 8 mL,继续用加热板加热烧杯,直到溶液体积蒸发至 2~3 mL,使用 10 mL 蒸馏水冲洗烧杯内壁,使其无样品残留,并微微加热烧杯 5~10 min,取下烧杯,待溶液冷却后放入带 10 mL 刻度的试管中,用蒸馏水稀释溶液使其到达试管刻度处,将其摇晃均匀,并静置,取 1.00 mL 上层清液于试管中,并加入 9 mL 浓度为 3% 的  $\text{HNO}_3$  溶液,摇晃均匀,用电感耦合等离子体质谱仪测定相应元素。

### 3.2.3 粒度测试

样品粒度由 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定。测试前处理如下:将样品中的有机质和碳酸盐去除干净,使样品颗粒充分分散,形成单颗粒。具体操作步骤如下:取约 0.5 g 烘干的土壤样品于

250 mL 烧杯中,用蒸馏水浸泡约 10 min;加入 10 mL 浓度为 30% 的  $\text{H}_2\text{O}_2$  来去除样品中的有机质,待其充分反应完全后,置于电热板上加热,去除过量的  $\text{H}_2\text{O}_2$ ;然后加入 10 mL 浓度为 10% 的  $\text{HCl}$ ,在电热板上加热至沸腾 15 min,直到样品不再反应,从而去除样品中的碳酸盐;在烧杯中加蒸馏水至最上部刻度线,并静置超过 24 h,取少量静置样品的上层清液于烧杯中,并加入 10 mL 的分散剂,用超声波振荡仪振荡 15 min 后进行测试。仪器配套的进样器为 Hydro 2000MU(A),粒径测试范围为 0.020~2000.000  $\mu\text{m}$ 。

样品分析依照,《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295201)进行,按规范要求加 10% 空白样与平行样控制,分析方法准确度和精密度采用国家一级标准物质(GBW 系列)控制,各指标的加标回收率均在国家标准参比物质的允许范围内。

## 4 分析结果

### 4.1 常量元素的分布特征

表 1 为阴山北麓岩石风化剖面中常量元素含量和化学蚀变指数,对比各地区岩石风化剖面中常量元素的变化,可以看出:

(1)低山丘陵区岩石风化剖面中, $\text{SiO}_2$  的含量较母岩均有不同程度的减少,说明该地区岩石风化剖面经历了一定程度的风化脱硅作用(Kanhaiya et al., 2018),个别剖面土壤层中  $\text{SiO}_2$  的含量高于风化层,说明这些剖面土壤层中有 Si 元素迁入,这可能与风蚀作用的沉降过程有关; $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量在剖面中从基岩层到土壤层基本表现为不断减少的趋势,与南方地区岩石风化过程中 Al 元素不断富集(黄成敏和龚子同, 2002)的理论相悖,说明该地区 Al 元素在风化过程中流失,这可能与风蚀作用的侵蚀过程有关;剖面  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的含量则不断增加,表现出与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  截然不同的变化规律,说明  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的稳定性更高,受外界影响的程度较小;花岗岩中 Mg、Ca 元素的含量较少,因此能够在风化过程中表现出一定程度的富集现象,而且受淋滤作用的影响在个别剖面风化层中进一步富集;花岗岩中含量较高的 Na、K 元素则在风化过程中表现为不断减少的趋势。

(2)中山区岩石风化剖面中,受母岩岩性影响,相同元素在不同剖面中的行为有所差异,但整体变

表 1 阴山北麓岩石风化剖面中常量元素含量及化学蚀变指数 (%)

Table 1 Major element content and chemical alteration index in rock weathering profile in the northern piedmont of Yin Mountain (%)

地貌区	点号	岩性	层位	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CIA	
低山丘陵	D01	花岗岩	土壤层	60.01	10.96	5.13	2.23	4.65	2.20	2.16	53.34	
			风化层	55.64	11.00	4.41	1.92	8.37	2.24	2.58	51.97	
			基岩层	67.56	13.59	2.12	0.74	0.61	3.46	5.95	50.66	
	D02	花岗岩	土壤层	61.12	11.54	4.30	1.78	3.27	2.25	2.48	53.37	
			风化层	62.04	12.50	2.43	0.88	6.07	2.74	3.78	48.84	
			基岩层	70.43	13.18	1.50	0.75	1.58	3.90	4.00	49.19	
	D03	花岗岩	土壤层	60.26	13.16	4.36	2.69	2.86	3.38	3.07	48.31	
			风化层	69.92	10.04	3.99	3.41	4.62	2.72	5.16	40.86	
			基岩层	67.28	14.40	1.58	0.33	0.73	5.14	5.47	47.83	
	D04	花岗岩	土壤层	57.36	13.10	5.62	2.17	2.60	2.25	2.13	57.45	
			风化层	58.87	14.72	4.46	1.93	3.89	3.78	1.88	50.44	
			基岩层	64.27	15.01	2.87	1.62	2.87	4.95	2.11	48.98	
	D05	花岗岩	土壤层	59.86	13.35	4.98	1.84	2.09	2.62	2.63	54.92	
			风化层	55.25	14.13	7.27	2.03	2.96	3.77	3.07	48.66	
			基岩层	63.50	13.67	3.82	1.72	3.00	4.25	4.04	44.83	
中山	D06	砂岩	土壤层	60.83	12.80	5.50	2.34	1.71	2.70	2.41	55.76	
			风化层	55.83	12.89	6.31	2.79	1.72	3.12	2.17	54.82	
			基岩层	50.88	11.16	3.69	2.42	11.82	3.43	1.71	45.92	
	D07	片麻岩	土壤层	57.36	13.47	6.73	2.57	1.73	1.47	2.61	63.71	
			风化层	47.87	9.36	3.66	6.10	2.58	0.21	6.62	54.36	
			基岩层	63.37	14.30	4.00	2.15	1.67	4.69	2.95	50.65	
	D08	花岗岩	土壤层	60.89	13.30	5.49	2.16	1.51	1.97	2.50	60.49	
			风化层	63.80	13.88	5.02	1.84	1.91	3.41	2.47	54.14	
			基岩层	72.99	13.35	1.57	0.77	1.51	3.57	4.89	48.99	
	D09	角闪岩	土壤层	58.24	13.56	6.67	2.25	2.38	2.53	2.68	54.68	
			风化层	56.27	14.48	7.00	2.23	2.24	2.71	2.66	55.93	
			基岩层	54.14	12.61	9.35	2.89	5.54	3.80	1.23	47.70	
	缓坡丘陵	D10	玄武岩	土壤层	49.15	14.69	9.05	2.94	5.39	1.95	1.70	64.00
				风化层	47.99	15.59	9.43	3.07	6.75	1.78	1.55	67.43
				基岩层	43.15	14.91	9.98	3.21	13.62	2.26	1.14	63.22
D11		玄武岩	土壤层	57.02	12.31	5.96	2.34	4.54	2.18	2.40	55.78	
			风化层	45.63	15.09	10.53	2.64	8.80	2.14	2.09	61.90	
			基岩层	47.41	14.09	9.99	4.07	9.50	3.51	2.25	50.21	
D12		玄武岩	土壤层	56.38	13.00	7.23	2.66	3.55	2.20	1.97	58.13	
			风化层	43.91	12.96	9.11	3.24	11.38	1.86	1.39	62.99	
			基岩层	49.11	14.91	9.64	3.82	8.94	3.65	1.46	52.33	

化趋势基本一致: SiO<sub>2</sub> 的含量相较于母岩以正常风化减少为主; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量则以增加为主; MgO、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O 的含量表现为不同程度的减少。常量元素在风化过程均表现出基本正常的地球化学行为, 说明该地区可能受风蚀作用的影响较小。

(3) 缓坡丘陵区岩石风化剖面土壤层中 SiO<sub>2</sub> 的含量相较于母岩显著增加, 说明该地区 Si 元素的迁入量更大; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量相较于母岩明显减少, 说明该地区 Al 元素的迁出量较大; 土壤层中 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量同样表现出明显减少, 说明稳定性较高的 Fe 元素也表现出一定程度的迁出。这些元素的显著异

常变化可能与该地区土壤层经历了比较强烈的风蚀作用有关。MgO、CaO、Na<sub>2</sub>O 和 K<sub>2</sub>O 的含量在风化过程中均表现出一定程度的减少, 玄武岩中 Mg、Ca 元素的含量更高, 减少的趋势也更明显。

化学蚀变指数(CIA=[Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O+CaO\*)]×100%)是判断化学风化程度的重要指标(Nesbitt and Young, 1982), 在岩石风化研究中应用广泛。式中 CaO\*是指硅酸盐中 CaO 的含量, 即需要去除碳酸盐和磷酸盐中的 CaO。从土壤和沉积物中准确分离和提纯硅酸盐矿物难度较大, 因此采用 McLennan 提出的方法对 CaO 的含量进行校正(McLennan, 1993): 若土壤或沉积物样品中

CaO 的摩尔数小于  $\text{Na}_2\text{O}$  的摩尔数, 则  $\text{CaO}^*=\text{CaO}$ ; 若土壤或沉积物样品中 CaO 的摩尔数大于  $\text{Na}_2\text{O}$  的摩尔数, 则  $\text{CaO}^*=\text{Na}_2\text{O}$ 。

一般来说, CIA 值介于 50~65, 反映寒冷干燥气候条件下低等的化学风化程度; CIA 值介于 65~85 之间, 反映温暖、湿润条件下中等的化学风化程度; CIA 值介于 85~100 反映气候环境的炎热、潮湿条件下强风化程度(Fedo et al., 1995; Yan et al., 2010)。由表 1 可以看出, 12 个剖面中, 除 D10 剖面风化层样品的 CIA 值超过了 65, 达到 67.43 外, 其他剖面样品的 CIA 值均低于 65, 部分剖面的 CIA 值甚至低于 50, 反映了研究区岩石风化剖面整体处于低等的化学风化程度。另外, 低山丘陵区和中山区岩石风化剖面由下到上, CIA 值不断增大, 符合前人所得出的越靠近剖面顶部, 岩石风化程度越深, CIA 值越大的风化规律(李徐生等, 2007); 而缓坡丘陵区岩石风化剖面中, 基岩层到风化层 CIA 值增大, 但土壤层中 CIA 值却表现为显著的减小趋势, CIA 最大值出现在风化层, 这可能与该地区土壤层受到了比较强烈的风蚀作用有关。

#### 4.2 微量元素的分布特征

风化过程中, 无论元素富集或是亏损, 相同剖面内部不同分层中稳定微量元素的行为总能保持相同的变化趋势, 使得微量元素在不同层位间表现出良好的继承性(陶澍等, 2001)。然而, 外来风化产物的迁入会改变微量元素本身的变化趋势, 打破不同层位元素之间的继承性(陈兴仁和周俊, 2012)。因此, 可以通过剖面土壤层和风化层中稳定微量元素与基岩层的继承性和差异性来判断剖面土壤层和风化层中是否有外来物质的迁入。

为了更好地比较岩石风化剖面中微量元素的含量, 需要将微量元素的含量进行标准化处理。上陆壳(UCC)元素丰度是地壳各种岩石各元素含量的加权平均值, 与土壤、母岩、地表水、生物等地球圈层各要素的元素丰度关系极为密切(刘文景等, 2010)。以样品中各微量元素的含量与上陆壳相对应的各微量元素的含量相比, 即得到微量元素的上陆壳标准化值。

使用大陆上地壳元素丰度值(UCC)(Rudnick and Fountain, 1995)进行标准化, 消除量级差后的结果见图 3。可以看出: 低山丘陵区岩石风化剖面(D01~

D05)中, 土壤层对风化层有着良好的继承性, 但两者相对于基岩层的继承性较差, 说明在风化过程中, 外界环境对土壤层和风化层有较显著的影响, 明显存在外来物质迁入; 中山区岩石风化剖面(D06~D09)中, 除 D06 剖面外, 其他 3 个剖面土壤层和风化层对基岩层的继承性均较差, 明显存在外来物质迁入; 缓坡丘陵区岩石风化剖面(D10~D12)相较于其他地区岩石剖面来说, 各层位之间的继承性最好, 但土壤层中微量元素与另外两层略有差异, 存在少量外来物质的迁入。研究区岩石风化剖面中外来物质的迁入, 可能与风蚀作用的沉降过程有关, 风蚀作用的强度越大, 外来物质的迁入量越小。

#### 4.3 土壤粒度的分布特征

岩石风化剖面的土壤层是受风蚀作用影响最直接、也是最显著的一层(Xiao et al., 2021)。不同强度的风蚀作用所影响的土壤粒度范围也不同(张腾飞, 2020), 这使得风蚀作用会对土壤粒度进行一定程度的分选(Chepil, 1953)。因此, 土壤层中土壤粒度的分布特征是对风蚀作用强度最直观反映。

12 个岩石风化剖面土壤层的粒度分布见表 2。可以看出: 研究区土壤层中, 粉粒(0.002~0.05 mm)的含量最高, 占总量的 50%~70%; 其次为极细砂(0.05~0.1 mm), 占总量的 15%~35%; 然后为细砂(0.1~0.25 mm)和黏粒(<0.002 mm), 分别占总量的 10% 和 5% 左右; 0.25 mm 以上的粗粒物质含量最少, 仅在个别剖面土壤层中有分布。低山丘陵区岩石风化剖面土壤层中, 粒径小于 0.05 mm 的黏粒和粉粒含量比其他地区略少、极细砂含量较高, 可能是风蚀作用对该地区土壤层中的黏粒和粉粒产生了一定程度的侵蚀, 并带来了少量的极细砂; 中山区岩石剖面土壤层中粉粒的含量较高, 可能是风蚀作用带来了外来粉粒物质的沉降, 风蚀作用更弱, 沉降物质更细; 缓坡丘陵区玄武岩剖面土壤层中黏粒的含量略高于其他地区, 可能是由玄武岩自身的岩性因素引起的。

## 5 讨 论

### 5.1 风蚀作用的影响

岩石风化成土是原岩矿物不断风化, 次生黏土矿物不断形成的过程(黄成敏和龚子同, 2000), 正常的风化过程会使土壤中黏土矿物含量逐渐积累。但是, 当土壤受到外力侵蚀时, 土壤中的黏土矿物

会在外力作用的影响下迁出, 而呈现出减少的特征(刘争光, 2021)。其中, 水力侵蚀和风力侵蚀是引起土壤侵蚀最主要的两个因素(唐克丽, 2004)。水力侵蚀通常表现为河流对其流经区域土壤的侵蚀(穆兴民等, 2016), 以及降雨产生的坡面径流对山坡表层土壤的冲刷(陈儒章等, 2016); 风力侵蚀则主要发生在干旱多风、地势平坦、植被稀疏的荒漠、戈壁等地区(张春来等, 2018)。

风蚀作用不仅仅会引起土壤层中黏土矿物等细粒风化产物的丢失, 还会造成外来物质的迁入(闫

玉春, 2008)。通过对岩石风化剖面微量元素上地壳标准化蛛网图(图 3)的分析可以发现, 低山丘陵区和中山区岩石风化剖面中土壤层和风化层相对于基岩层的继承性较差, 明显存在外来物质迁入。强度一定的风蚀作用会对土壤中固定大小的颗粒进行侵蚀, 风蚀作用强度的增大会带走土壤中颗粒更粗的物质(张加琼等, 2018), 两者均不会引起外来物质的迁入, 只有风蚀作用强度下降、风的承载能力降低时, 风中所携带的物质才会沉降。因此认为低山丘陵区和中山区的风蚀作用强度有所减弱。

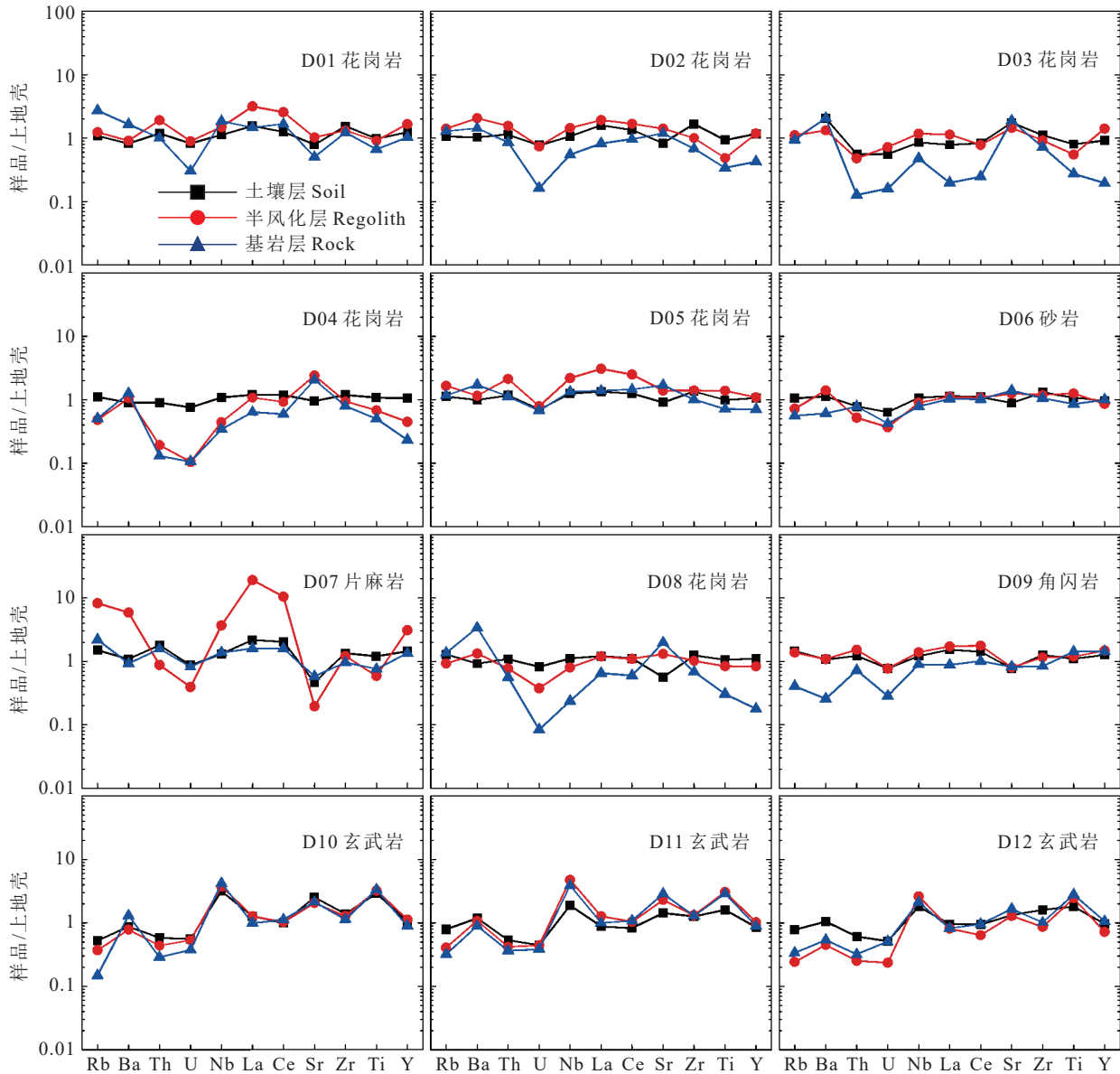


图 3 阴山北麓岩石风化剖面上地壳标准化微量元素分布图

Fig.3 Upper crust-normalized trace element variation diagram of rock weathering profile in the northern piedmont of Yin Mountain



缓坡丘陵区岩石风化剖面各层位间的继承性很好,基本不存在外来物质迁入,只有土壤层表现出轻微的差异性,存在少量外来物质的迁入,说明该地区风蚀作用较强。

通过对研究区岩石风化剖面 CIA 的计算(表 1)可以发现,缓坡丘陵区岩石风化剖面出现了土壤层化学风化程度低于风化层的现象。根据 CIA 的计算公式(Nesbitt and Young, 1982),CIA 值的减小通常是由 Al 元素含量减少和 K、Na、Ca 元素含量增加引起的,而风化过程中 K、Na、Ca 元素基本处于淋失状态,因此 Al 元素含量显著降低是引起 CIA 值降低的主要原因。这说明,缓坡丘陵区经历了更加强烈的风蚀作用,土壤受到严重侵蚀,土壤层中黏土矿物等风化产物大量迁出,导致  $Al_2O_3$  含量降低,CIA 值减小。

结合不同地区岩石风化剖面中土壤粒度的分布特征(表 2)可以看出,低山丘陵区花岗岩剖面土壤层中,黏粒和粉粒的含量相比于其他地区有所减少,极细砂的含量有所增加,说明该地区迁出物质以粒径小于 0.05 mm 的黏粒和粉粒物质为主,迁入物质以粒径为 0.05~0.1 mm 的极细砂为主;中山区岩石剖面土壤层中,粉粒的含量相比于其他地区有所增加,说明该地区迁入物质主要为粒径 0.002~0.05 mm 的粉粒。这两个地区土壤粒度反映出的风蚀作用强度特征与元素分布反映的风蚀作用强度一致。然而,受风蚀作用影响最大的缓坡丘陵区,其玄武岩剖面土壤层中黏粒的含量却略高于其他地区。一般情况下,玄武岩中的矿物较花岗岩更易

风化(罗莉, 2018),两者在相同的自然风化条件下,玄武岩的风化程度更高,风化形成的土壤粒度更细。徐加盼等(2020)通过探讨不同母质发育土壤的粒度组成差异,发现花岗岩发育的土壤大颗粒含量高,粒径分布范围大。黄镇国(1996)曾提出,风化壳中黏粒组分的含量同样可以反映风化强度,黏粒组分含量越高,风化强度越大。因此缓坡丘陵区虽然风蚀作用强度大,但玄武岩所形成的土壤中黏粒较高。本研究中,表 2 可以看出,缓坡丘陵区玄武岩剖面土壤层中黏粒(<0.002 mm)含量明显高于低山丘陵区花岗岩剖面,这与同样反映风化强度的 CIA 值(表 1)相对应:缓坡丘陵区玄武岩剖面土壤层 CIA(CIA 平均值为 59.30)普遍高于低山丘陵区花岗岩剖面(CIA 平均值为 53.48)。

## 5.2 生态地质特征与生态系统的耦合模式

通过收集固阳、武川、呼和浩特和察哈尔右旗后旗四个气象站的数据,发现研究区内多年平均气温为 6.5~7.8℃、多年平均降雨量为 261~337 mm,波状高原区、低山丘陵区和中山区差别不大,与海拔没有明显的相关性,其中低山丘陵区降雨量相对较高。因此认为,温差与降雨量可能不是生态特征差异的主导因素。

阴山北麓属于典型的农牧林交错区(孙悦超等, 2013; 王彦阁等, 2019),风蚀作用较强,土壤易发生侵蚀(李晓丽, 2007)。该地区自北向南地势逐渐增高,地貌类型依次为波状高原、缓坡丘陵、低山丘陵、中山,空间分布呈阶梯状。携带大量细粒物质的北风、西风依次经过这些地区时,随着地势不断

表 2 阴山北麓岩石风化剖面表层土壤粒度统计 (%)

地貌区	粒度名称	黏粒	粉粒	极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂
	粒径/mm	<0.002	0.002~0.05	0.05~0.1	0.1~0.25	0.25~0.5	0.5~1	1~2
低山丘陵	D01花岗岩	4.45	48.39	34.54	12.62	0.00	0.00	0.00
	D02花岗岩	4.52	47.59	32.80	11.80	2.16	1.13	0.00
	D03花岗岩	3.93	62.20	17.80	8.97	6.00	1.10	0.00
	D04花岗岩	3.66	71.67	19.98	3.39	1.29	0.01	0.00
	D05花岗岩	5.27	58.45	20.78	6.81	2.93	5.33	0.43
中山	D06砂岩	5.13	60.54	13.96	9.99	8.21	2.17	0.00
	D07片麻岩	4.11	64.69	18.42	5.72	3.58	3.12	0.36
	D08花岗岩	6.97	70.96	18.17	3.90	0.00	0.00	0.00
	D09角闪岩	4.39	64.51	16.30	6.43	5.56	2.78	0.03
缓坡丘陵	D10玄武岩	5.70	68.57	18.75	6.40	0.58	0.00	0.00
	D11玄武岩	5.67	62.39	16.38	12.14	3.42	0.00	0.00
	D12玄武岩	4.82	63.32	16.87	7.40	6.85	0.74	0.00

升高, 地形不断复杂, 风蚀作用逐渐减弱, 风中所携带的物质随风蚀作用的减弱而逐渐沉降(图 4)。

波状高原区是阴山北麓与内蒙古高原相接的过渡区域, 平均海拔在 1300 m 左右, 其植被类型和地质条件与内蒙古高原基本一致, 植被稀少、风力强盛, 是研究区风沙的重要来源。

缓坡丘陵区对应研究区东部(阴山东段, D10~D12 剖面), 该地区相对平坦开阔, 平均海拔在 1550 m 左右, 受风蚀作用的影响较大。海拔的提升和地形的起伏会使风蚀作用相对于波状高原区略微减弱, 颗粒较粗的物质会在此处轻微沉降, 使得土壤层中 SiO<sub>2</sub> 含量显著增加; 岩石风化形成的细粒物质(黏土矿物)则会以悬移的方式随风迁移, 导致土壤层中 Al、Fe、Ca、Mg、Ti 等原本含量较高的元素迁出, 含量显著降低, 并导致剖面土壤层的 CIA 值小于风化层(表 1)。该地区风蚀作用的影响以侵蚀为

主, 较强的风蚀作用导致细粒物质的大量迁出使土壤层厚度变薄(基本不超过 20 cm), 养分流失, 导致整体风化程度更高(CIA 平均值为 59.55)的玄武岩地区植被类型以草为主, 且整体植被覆盖度较低, 存在土地沙化现象。

低山丘陵区对应研究区西部(阴山中段大青山西段, D01~D05 剖面), 该地区平均海拔在 1650 m 左右。进一步提升的海拔和复杂的地形使风蚀作用强度减弱, 影响变小, 风蚀过程以细粒物质交换为主。其中, 迁入物质主要为粒径 0.05~0.1 mm 的极细砂, 含有 Si 元素和少量 Al 元素。迁入的 Si 元素与脱硅化作用和 Si 元素的迁出量而言, 含量较少, SiO<sub>2</sub> 的整体含量较母岩仍然表现为不同程度的减少, 仅在个别剖面中表现为含量的增加。迁出物质为粒径小于 0.05 mm 的黏粒和粉粒, 在元素上主要表现为 Al、Si、K、Na 元素的迁出, 由于迁出物质

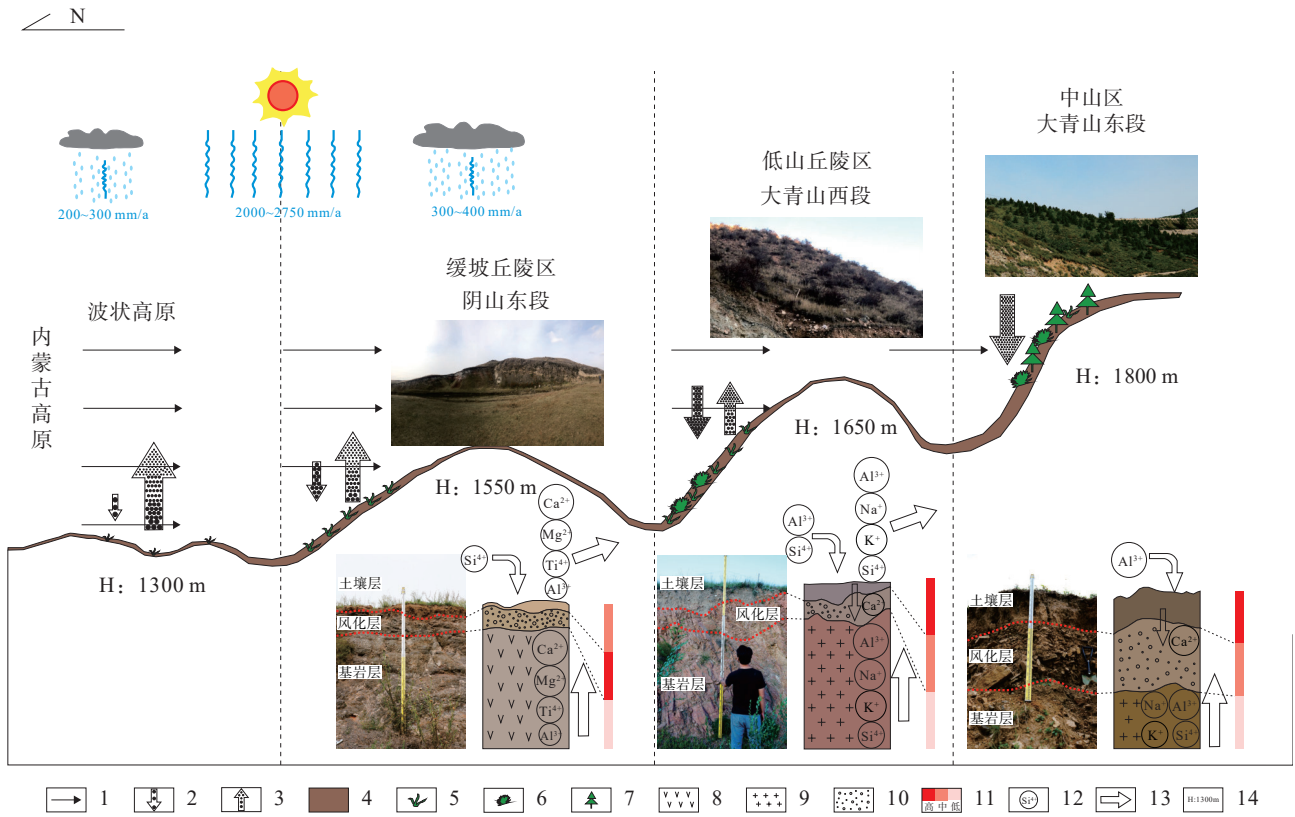


图 4 阴山北麓生态地质作用模式图

1—风蚀作用强度; 2—物质迁入; 3—物质迁出; 4—土壤层; 5—草本植物; 6—灌木; 7—乔木; 8—玄武岩; 9—花岗岩; 10—砂岩; 11—CIA; 12—元素符号; 13—物质迁移方向; 14—海拔高度

Fig.4 Eco-geology model of the bedrock weathering under wind erosion in the north piedmont of Yinshan Mountain  
1—Wind erosion intensity; 2—Moved in materials; 3—Moved out materials; 4—Soil; 5—Herbaceous plant; 6—Shrub; 7—Arbor; 8—Basalt; 9—Granite; 10—Sandstone; 11—CIA; 12—Elements symbol; 13—Direction of material migration; 14—Height

比迁入物质粒度更细, Al 元素迁出量比迁入量更大, 因此  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量在剖面中表现为不断减少的趋势。但  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的减少仅导致了 CIA 值的降低, 不足以改变剖面各层风化程度的顺序, 该地区的岩石风化剖面仍然表现出相对正常的风化程度, 即土壤层的化学风化程度大于风化层(表 1)。同时风蚀作用是一个连续作用的过程, 参与岩石风化的各个阶段, 因此, 该地区岩石风化剖面土壤层和风化层中微量元素的行为基本一致, 有着良好的继承性, 而外来细颗粒物质的迁入使它们与基岩层表现出一定程度的差异性(图 3)。风化产物中细粒物质的迁出导致土壤层中的养分有所流失, 但风蚀作用的强度较小, 与缓坡丘陵区相比土壤层厚度有所增加(20~40 cm), 植被类型仍以草为主, 但分布更加密集, 并可见低矮灌木生长, 植被覆盖度明显提高, 仅在局部存在土地沙化。

中山区对应研究区中部(阴山中段大青山东段, D06~D09 剖面), 该地区更靠近阴山, 平均海拔在 1800 m 左右, 风蚀作用在阴山山脉的阻挡下近乎消失, 因此该地区基本不存在风化产物迁出, 以细粒物质的沉降为主。迁入物质主要为粒度小于 0.05 mm 的粉粒和黏粒, 其中 Al 元素含量较多, Si 元素含量较少, 在个别风化程度较低的剖面中表现为少量 Si 元素的迁入。由于基本不存在风化产物迁出, 岩石剖面遵循正常的风化规律,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量相较于母岩以增加为主; MgO、CaO、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量受风化淋失作用, 表现出不同程度的减少; CIA 值表现为土壤层>风化层>基岩层。另外, 细粒物质的迁入使得该地区岩石风化剖面土壤层和风化层中微量元素的行为与基岩层表现出明显差异。相对于低山丘陵区该地区土壤层厚度略微增加(25~40 cm), 植被类型为乔木、低矮灌木和草, 长势较好, 植被覆盖度较高。

从地质学的角度讨论生态条件与生态系统的耦合关系, 对揭示生态问题的形成机理, 合理进行生态环境保护和生态问题修复治理具有重要意义。通过研究风蚀作用对阴山北麓不同地貌区岩石风化成土过程的影响, 发现风蚀作用对各地貌类型区的不同影响导致岩石风化成土过程有所差异, 最终形成了不同的植被类型。因此认为, 风蚀作用强度是控制该地区生态类型的主要因素。

## 6 结 论

(1)研究区 12 个岩石风化剖面中, 除 D10 剖面风化层样品的 CIA 值超过了 65 外, 其他剖面样品的 CIA 值均低于 65, 部分剖面的 CIA 值甚至低于 50, 表明该地区岩石风化剖面整体处于低等的化学风化程度。另外, 部分岩石风化剖面受土壤侵蚀的影响, 出现了土壤层化学风化程度小于风化层的现象。

(2)缓坡丘陵区海拔较低, 地形开阔, 受风蚀作用影响较大, 存在少量粗粒物质迁入和大量细粒物质迁出, 导致土壤中  $\text{SiO}_2$  的含量增加,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量明显减少, 土壤层 CIA 值小于风化层, 同时造成土壤层厚度变薄, 养分流失, 不利于植被生长, 植被类型以草为主, 密度、植被覆盖度较低, 存在土地沙化的现象。

(3)低山丘陵区海拔略高, 地形复杂, 受风蚀作用影响相对较小, 以细粒物质交换为主, 因此土壤层中黏粒、粉粒含量略有减少,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量减少, 极细砂含量增加, 土壤层和风化层中微量元素行为与基岩层表现出一定的差异性, 但土壤层 CIA 值仍大于风化层。土壤层厚度相对缓坡丘陵区有所增加, 养分流失较少, 植被类型以草为主, 但更加密集, 可见低矮灌木, 植被覆盖度明显增加, 仅局部存在土地沙化。

(4)中山区海拔最高, 地形以山地为主, 受风蚀作用影响最小, 以细粒物质沉降为主, 因此土壤层中粉粒含量有所增加,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量增加, 土壤层和风化层中微量元素行为与基岩层表现出明显差异, 但剖面风化层序不受影响, 土壤层 CIA 值大于风化层。由于基本不存在风化产物迁出, 土壤层厚度略微增加, 植被类型为乔木、低矮灌木和草, 长势较好, 覆盖度较高。

## References

- Carni A, Matevski V, Juvan N, Kostadinovski M. 2016. Transition along gradient from warm to mesic temperate forests evaluated by GAMM[J]. *Journal of Plant Ecology*, 9(4): 421-433.
- Chen Ruzhang, Zhang Liping, Wu Yanhong, Qiu Luyang. 2016. Soil profile weathering feature of eroded weathering granite slope at different sections[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 53(6): 1380-1388 (in Chinese with English abstract).

- Chen Xingren, Zhou Jun. 2012. Features of distribution of trace elements in soils in the Jianghuai Area, Anhui and analysis of the cause of formation[J]. *Geology of Anhui*, 22(2): 123–129 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhengxin, Wei Enfeng. 2002. Strategies for rejuvenation of degenerated natural grassland within northern agro–grazing ecotone of Yinshan Mountains, Inner Mongolia[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 9(1): 41–45 (in Chinese with English abstract).
- Chepil W S. 1953. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind[J]. *Soil Science*, 75(6): 473–484.
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary–rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 23(10): 921–924.
- Huang Chengmin, Gong Zitong. 2000. Quantitative study on the development of soils derived from basalts in northern Hainan island[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 20(4): 337–342 (in Chinese with English abstract).
- Huang Chengmin, Gong Zitong. 2002. Study on genesis of soils derived from basal in northern Hainan island III. element geochemistry[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 39(5): 643–652 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhenguo. 1966. *Red Weathering Crust in South China*[M]. Beijing: China Ocean Press (in Chinese).
- Jian Zhonghua, Xu Mingxing, Song Mingyi, Huang Chunlei, Zheng Wen, Chen Zaihong. 2013. Impacts of different soil parent material on quality of Pujiang peach–shaped plum[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 41(10): 4356–4361 (in Chinese with English abstract).
- Kanhaiya S, Singh B P, Singh S. 2018. Mineralogical and geochemical behavior of sediments solely derived from Bundelkhand granitic complex, Central India: Implications to provenance and source rock weathering[J]. *Geochemistry International*, 56(12): 1245–1262.
- Li Dajing, Xu Ruiyang, Ding Xue, Wang Ziyu, Song Alin. 2018. Changes of wind erosion climatic erosivity and vegetation dynamics response in northern China from 1981 to 2020[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 25(2): 15–20.
- Li Xiaoli, Shen Xiangdong, Zhang Yajing. 2006. Experimental analysis on soil wind–erosion amount in Siziwang Banner North Yinshan Mountain, Inner Mongolia[J]. *Arid Land Geography*, 29(2): 292–296 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoli. 2007. Experimental Study on Influencing Factors of Soil Wind Erosion and Its Movement Characteristics in Northern Foot of Yinshan Mountain[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 1–131 (in Chinese with English abstract).
- Li Xusheng, Han Zhiyong, Yang Shouye, Chen Yingyong, Wang Yongbo, Yang Dayuan. 2007. Chemical weathering intensity and element migration features of the Xiashu loess profile in zhenjiang[J]. *Acta Geographica Sinica*, 62(11): 1174–1184 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhengji. 1996. Large scale system of rock–soil–plant[J]. *Geological Review*, 42(4): 369–372 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wenjing, Tu Chenglong, Lang Yunchao, Feng Jiayi, Li Longbo, Wang Qilian, Liu Congqiang. 2010. Major and trace element compositions of yellow and limestone soils in the karst area of southwest China: Implications for weathering and soil–formation processes[J]. *Earth and Environment*, 38(3): 271–279 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhengguang. 2021. Advances in soil erosion research[J]. *Agriculture and Technology*, 41(4): 92–96 (in Chinese).
- Luo Li. 2018. Analysis of factors affecting the degree of rock weathering[J]. *Chemical Enterprise Management*, 28: 19–20 (in Chinese with English abstract).
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation[J]. *Journal of Geology*, 101(2): 295–303.
- Mu Xingmin, Li Pengfei, Gao Peng, Zhao Guangju, Sun Wenyi. 2016. Review and evaluation of soil erosion models applied to China loess plateau[J]. *Yellow River*, 38(10): 100–110,114 (in Chinese with English abstract).
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299(5885): 715–717.
- Rudnick R L, Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective[J]. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267–309.
- Song Zhaoliang, Hang Hao, Luo Weijun, Liu Taoze. 2020. Soil evolution and its controlling mechanisms in a critical zone[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(1): 24–29.
- Sun Houyun, Sun Xiaoming, Jia Fengchao, Wang Yanli, Li Duojie, Li Jian. 2020. The eco–geochemical characteristics of germanium and its relationship with the genuine medicinal material scutellaria baicalensis in Chengde, Hebei province[J]. *Geology in China*, 47(6): 1646–1667 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yuechao, Chen Zhi, Zhao Yonglai, Su Jie, Pan Kun, Dongmei. 2013. Test of grassland soil erosion of farming–pastoral zone in northern foot of Yinshan Mountains[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 44(6): 143–147 (in Chinese with English abstract).
- Tang Keli. 2004. *Soil and Water Conservation in China*[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Tao Shu, Cao Jun, Li Bengang, Xu Fuli, Chen Weiyuan. 2001. Distribution pattern of trace elements in soil from Shenzhen area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 38(2): 248–255 (in Chinese with English abstract).
- Trofimov V T. 2013. Current state, tasks, and problems of the further development of ecological geology[J]. *Moscow University Geology Bulletin*, 68(3): 155–164.
- Wang X M, Yi Y, Dong Z B, Zhang C X. 2009. Responses of dune activity and desertification in china to global warming in the

- twenty-first century[J]. *Global & Planetary Change*, 67(3/4): 167–185.
- Wang Yang, Hu Xiaohai, Sun Hailian, Zhai Xiu, Liang Jiye. 2019. Soil erosion and conservation at agro-pastoral ecotone of north piedmont in Yinshan Mountain during 2000 to 2015[J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 39(2): 127–135 (in Chinese with English abstract).
- Wei Jie, Cao Jianjun, Li Xifei. 2003. Forestry ecological construction and sustainable management countermeasures in hilly wind-erosion desertization area in north of Yinshan Mountains in Inner Mongolia[J]. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design*, 26(2): 14–16, 42 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xiaoguang. 2019. The Soil Wind Erosion Influence and Effect of Ecological De-farming on the North Foot of Yinshan Mountain in Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 1–213 (in Chinese with English abstract).
- Xiao L G, Li G Q, Zhao R Q, Zhang L. 2021. Effects of soil conservation measures on wind erosion control in China: A synthesis[J]. *Science of the Total Environment*, 778: 146308.
- Xu Jiapan, Li Jihong, Wei Yujie. 2020. Fractal characteristics of particle composition for soils developed from different parent materials[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 57(5): 1197–1205 (in Chinese with English abstract).
- Yan D T, Chen D Z, Wang Q C, Wang J G. 2010. Large-scale climatic fluctuations in the latest ordovician on the Yangtze block, South China[J]. *Geology*, 38(7): 599–602.
- Yan Yuchun. 2008. Degradation, Restoration and Carbon Sequestration Dynamics of Typical Steppe in Inner Mongolia Under Grazing, Reclamation and Enclosure[D]. Beijing: Beijing Normal University, 1–213 (in Chinese with English abstract).
- Yang Junxiong, Liu Congqiang, Zhao Zhiqi, Ding Hu, Liu Taoze, Tu Chenglong, Fan Bailing, Huang Lu. 2016. Geochemical behavior of rare-earth element during the weathering of granite under different climatic conditions[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 36(1): 128–140 (in Chinese with English abstract).
- Yue Y J, Shi P J, Zou X Y, Ye X Y, Zhu A X, Wang J A. 2015. The measurement of wind erosion through field survey and remote sensing: A case study of the Mu Us Desert, China[J]. *Natural Hazards*, 76(3): 1497–1514.
- Zhang Chunlai, Song Changqing, Wang Zhenting, Zhou Xueyong, Wang Xuesong. 2018. Review and prospect of the study on soil wind erosion process[J]. *Advances in Earth Science*, 33(1): 27–41 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiaqiong, Liu Zhang, Yang Mingyi, Zhang Fengbao, Wang Yongji, Deng Xinxin. 2018. Soil erosion and its influence factors on a slope in the wind-water erosion crisscross region on the loess plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 25(1): 1–6, 22 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kun, Ji Hongbing, Chu Huashuo, Song Changshun, Wu Yanfei. 2018. Material sources and element migration characteristics of red weathering crusts in southwestern Guizhou[J]. *Earth and Environment*, 46(3): 257–266.
- Zhang Tengfei. 2020. Effect of wind erosion on soil grain size characteristics of newly cultivated land[J]. *Agriculture and Technology*, 40(18): 121–123 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Haipeng, Song Hongquan, Liu Pengfei, Li Xiaoyang, Wang Tuanhui. 2019. Spatio-temporal variations of soil organic matter and nutrient losses resulted from wind erosion in northern China from 1980 to 2015[J]. *Geographical Research*, 38(11): 2778–2789 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yong, Wang Deshui. 1999. Analysis on the present situation of farming-pastoral ecotone in China[J]. *Management for Economy in Agricultural Scientific*, (1): 18–20 (in Chinese).

### 附中文参考文献

- 陈儒章, 张丽萍, 邹燕虹, 邱陆晔. 2016. 侵蚀性花岗岩坡地不同地貌部位土壤剖面风化特征研究[J]. *土壤学报*, 53(6): 1380–1388.
- 陈兴仁, 周俊. 2012. 安徽江淮地区土壤微量元素分布特征及成因分析[J]. *安徽地质*, 22(2): 123–129.
- 陈正新, 尉恩凤. 2002. 内蒙古阴山北麓农牧交错带退化草地复壮对策[J]. *水土保持研究*, 9(1): 41–45.
- 黄成敏, 龚子同. 2000. 海南岛北部玄武岩上土壤发育过程的定量研究[J]. *地理科学*, 20(4): 337–342.
- 黄成敏, 龚子同. 2002. 海南岛北部玄武岩上土壤发生研究Ⅲ. 元素地球化学特征[J]. *土壤学报*, 39(5): 643–652.
- 黄镇国. 1996. 中国南方红色风化壳[M]. 北京: 海洋出版社.
- 简中华, 徐明星, 宋明义, 黄春雷, 郑文, 陈再宏. 2013. 不同成土母质对浦江桃形李品质的影响[J]. *安徽农业科学*, 41(10): 4356–4361.
- 李达净, 许端阳, 丁雪, 王子玉, 宋阿琳. 2018. 1981—2010年中国北方风蚀气候侵蚀力演变与植被动态响应[J]. *水土保持研究*, 25(2): 15–20.
- 李晓丽, 申向东, 张雅静. 2006. 内蒙古阴山北部四子王旗土壤风蚀量的测试分析[J]. *干旱区地理*, 29(2): 292–296.
- 李晓丽. 2007. 阴山北麓土壤风蚀的影响因素及运动特性的试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 1–131.
- 李徐生, 韩志勇, 杨守业, 陈英勇, 王永波, 杨达源. 2007. 镇江下蜀土剖面的化学风化强度与元素迁移特征[J]. *地理学报*, 62(11): 1174–1184.
- 李正积. 1996. 时代前缘的全息探索—岩土植物大系统研究[J]. *地质论评*, 42(4): 369–372.
- 刘文景, 涂成龙, 郎赞超, 冯家毅, 李龙波, 汪齐连, 刘丛强. 2010. 喀斯特地区黄壤和石灰土剖面化学组成变化与风化成土过程[J]. *地球与环境*, 38(3): 271–279.
- 刘争光. 2021. 土壤侵蚀研究进展[J]. *农业与技术*, 41(4): 92–96.
- 罗莉. 2018. 岩石风化程度影响因素浅析[J]. *化工管理*, (28): 19–20.
- 穆兴民, 李朋飞, 高鹏, 赵广举, 孙文义. 2016. 土壤侵蚀模型在黄土高原的应用述评[J]. *人民黄河*, 38(10): 100–110, 114.
- 宋照亮, 张浩, 罗维均, 刘涛泽. 2020. 关键带土壤演化及其控制机制研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 39(1): 24–29.
- 孙厚云, 孙晓明, 贾凤超, 王艳丽, 李多杰, 李健. 2020. 河北承德锆元

- 素生态地球化学特征及其与道地药材黄芩适生关系[J]. 中国地质, 47(6): 1646-1667
- 孙悦超, 陈智, 赵永来, 苏洁, 潘坤, 冬梅. 2013. 阴山北麓农牧交错区草地土壤风蚀测试[J]. 农业机械学报, 44(6): 143-147.
- 唐克丽. 2004. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社.
- 陶澍, 曹军, 李本纲, 徐福留, 陈伟元. 2001. 深圳市土壤微量元素含量成因分析[J]. 土壤学报, 38(2): 248-255.
- 王彦阁, 胡晓海, 孙海莲, 翟琇, 梁继业. 2019. 阴山北麓农牧交错区 2000—2015 年土壤流失及保持量变化研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 39(2): 127-135.
- 魏洁, 曹建军, 李希飞. 2003. 内蒙古阴山北部丘陵风蚀沙化区林业生态建设与可持续经营对策[J]. 内蒙古林业调查设计, 26(2): 14-16, 42.
- 吴晓光. 2019. 内蒙古阴山北麓生态退耕对土壤风蚀的影响及效应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 1-213.
- 徐加盼, 李继洪, 魏玉杰, 张光辉, 阳邦戈, 蔡崇法. 2020. 不同母质类型发育土壤颗粒组成分形特征[J]. 土壤学报, 57(5): 1197-1205.
- 闫玉春. 2008. 放牧、开垦与围封下内蒙古典型草原的退化与恢复及碳截存动态[D]. 北京: 北京师范大学, 1-213.
- 杨骏雄, 刘丛强, 赵志琦, 丁虎, 刘涛泽, 涂成龙, 范百龄, 黄露. 2016. 不同气候带花岗岩风化过程中稀土元素的地球化学行为[J]. 矿物学报, 36(1): 128-140.
- 张春来, 宋长青, 王振亭, 邹学勇, 王雪松. 2018. 土壤风蚀过程研究回顾与展望[J]. 地球科学进展, 33(1): 27-41.
- 张加琼, 刘章, 杨明义, 张风宝, 王永吉, 邓鑫欣. 2018. 黄土高原水蚀风蚀交错带坡面土壤侵蚀特征及其影响因素[J]. 水土保持研究, 25(1): 1-6, 22.
- 张坤, 季宏兵, 褚华硕, 宋长顺, 吴燕飞. 2018. 黔西南喀斯特地区红色风化壳的物源及元素迁移特征[J]. 地球与环境, 46(3): 257-266.
- 张腾飞. 2020. 风力侵蚀作用对新增耕地土壤粒度特征的影响[J]. 农业与技术, 40(18): 121-123.
- 赵海鹏, 宋宏权, 刘鹏飞, 李霄阳, 王团徽. 2019. 1980—2015 年风蚀影响下中国北方土壤有机质与养分流失时空特征[J]. 地理研究, 38(11): 2778-2789.
- 周涌, 汪德水. 1999. 中国农牧交错带现状分析[J]. 农业科研经济管理, (1): 18-20.