

沙漠矿物组成与生态修复的互馈关系研究

田世民¹, 袁榆梁², 李锦荣³, 王远见¹, 江恩慧¹

(1. 黄河水利科学研究院 水利部泥沙重点实验室, 河南 郑州 450003;

2. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州 450016; 3. 水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要:以乌兰布和沙漠和库布齐沙漠为研究区域,在流动沙丘、半固定沙丘和固定沙丘分别采集表层(0~20 cm)、中层(20~40 cm)和底层(40~60 cm)沙样,分析了沙漠不同深度沙样的粒径组成、矿物成分、风化程度及三者之间的关系。针对不同植被覆盖区域进行采样,研究了沙漠生态修复与风化程度、黏性矿物含量之间的关系,揭示了沙漠矿物风化程度与生态修复的互馈关系。结果表明:沙漠表层沙样粒径小于中层和底层沙样,黏性矿物含量高于中层和底层;风化程度越高,黏性矿物含量越高,粒径组成越细。植被盖度与矿物风化程度和黏性矿物含量之间具有良好的关系,植被盖度由4%增加至18%~22%时,黏性矿物含量和风化程度增加速率较快,之后增加速率减小。矿物风化程度随生态修复的时间逐渐增加,对库布齐沙漠来说,随着植被盖度和风化程度增加,黏性矿物中伊利石含量显著增加。

关键词:沙漠;黏性矿物;风化;生态修复;互馈关系

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.202000086

1 研究背景

土地沙漠化是当今世界面临的环境-社会-经济问题之一,全球沙漠面积已占陆地总面积的10%左右,还有43%的土地正面临着沙漠化的威胁。我国沙漠化土地的面积已达173万km²,占国土总面积的18.03%^[1]。沙漠生态修复一直是我国持续推进的一项重要工作,经过持续的治理,1992~2015年,中国沙漠面积减少了86704 km²^[2],但仍有3万多km²的土地有沙漠化的趋势^[1]。通过长期的研究,我国研究者在沙漠化过程^[3]、沙漠化成因^[4]以及沙漠化防治^[5]等方面取得了较大的进展。除了宏观层面的研究,许多研究者围绕沙漠植被蒸散发^[6]、沙丘降雨入渗^[7]以及风蚀模拟^[8]等方面开展了细致深入的研究,深化了沙漠生态修复的理论研究。

在沙漠生态修复中,地表结皮的形成是最关键的一步^[9],地表结皮是荒漠生态系统的重要构建者^[10],其形成和发育与土壤类型密切相关,土壤中黏性颗粒对地表结皮的形成具有重要的促进作用^[11]。沙漠的主要组成物质是风动沙,中值粒径为0.05~0.25 mm,矿物成分以石英为主,黏性颗粒含量较低。在无人工干预下,沙漠土壤中非黏性矿物在风化作用下转化为黏性矿物是沙漠黏性颗粒的主要来源^[12]。沙漠土壤矿物组成包括黏性矿物和非黏性矿物,黏性矿物包括伊利石、高岭石、绿泥石、伊蒙混层、绿蒙混层等,是黏性颗粒的重要组成部分。非黏性矿物包括石英、钾长石、斜长石、方解石、白云石、角闪石、云母等。风化作用包括物理风化、化学风化和生物风化,其中化学风化和生物风化可生成黏性矿物。非黏性矿物通过风化作用可转化为黏性矿物,如长石风化后,因

收稿日期:2020-02-18;网络首发时间:2020-04-20

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200420.1355.003.html>

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0407401);国家自然科学基金项目(51979120);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2018-07, HKY-JBYW-2019-10, HKY-JBYW2019-19)

作者简介:田世民(1981-),博士,教授级高级工程师,研究方向为河流演变与河流生态。E-mail: tsm1981@163.com

通讯作者:江恩慧(1963-),博士,教授级高级工程师,研究方向为河流泥沙。E-mail: jiangenhui@hky.yrcc.gov.cn

土壤环境的不同,可形成绢云母、伊利石、蒙脱石、高岭石等黏性矿物;云母风化后形成膨胀性矿物和非膨胀性矿物,前者如蛭石和蒙脱石,后者有绿泥石和高岭石等;角闪石风化后演变成高岭石、碳酸盐和蛋白石等^[13]。

黏性颗粒是沙漠植被恢复的重要基础,为沙漠地表结皮形成和植被发育奠定基础。同时,植被发育进一步促进风化作用并减少黏性颗粒的风蚀,植被发育、沙漠矿物风化和黏性颗粒含量之间存在着密切的关系,识别其内在作用机制,对我国沙漠生态修复具有重要意义。本文以乌兰布和沙漠和库布齐沙漠为例,研究植被发育、沙漠矿物风化和黏性颗粒含量之间的相互作用关系,揭示矿物风化对沙漠黏性颗粒含量以及植被修复对沙漠矿物风化的影响,阐明在沙漠生态修复过程中矿物风化、黏性矿物含量、植被修复三者之间的互馈关系,可进一步深化我国沙漠生态修复的理论研究,并为乌兰布和沙漠以及我国其它地区沙漠生态修复提供技术支撑。

2 研究区域与研究方法

2.1 研究区域 乌兰布和沙漠位于内蒙古自治区西部,乌海市乌达区与巴彦淖尔市磴口县之间,地处我国西北荒漠化和半荒漠化的前沿地带,面积约 1.3万 km^2 ^[14]。年降水量为 $90\sim 142.7\text{ mm}$,年蒸发量 2240 mm ^[15],属于中温带大陆性干旱季风气候。研究认为,乌兰布和沙漠形成于西汉时期^[16],人类活动、气候变化^[15]以及区域地质构造运动^[17]等是乌兰布和沙漠形成的主要原因。沙丘以圆锥形和新月形沙丘为主^[18],其中流动沙丘占 36.9% ,半固定沙丘占 33.3% ,固定沙丘占 29.8% 。灌木植被群落是乌兰布和沙漠生态系统中最重要的重要组成部分^[19],如白刺、油蒿、梭梭等^[20],其中梭梭是沙漠典型的沙地植被类型^[21]。风沙季节在11月至翌年5月之间,主风为西风和西北风^[22]。库布齐沙漠是我国第七大沙漠,位于内蒙古鄂尔多斯高原北缘,西、北、东三面以黄河为界限,沙漠总长约 400 km ,总面积 1.33万 km^2 ^[23]。沙漠沙丘形态以网状沙丘和沙丘链为主,土壤类型以风沙土为主,沙漠腹地多为蜂窝状沙丘,地势南高北低。库布齐沙漠属于中温带大陆性干旱气候,夏秋温暖少雨,冬季风大干燥,年均降水量约 186 mm ,年均气温 $6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均风速 3.2 m/s ,最大瞬时风速 30 m/s ,风向多为南风 and 东南风^[24]。近年来,在政府及社会各方的共同治理下,通过一系列生态修复措施,沙漠化得到有效控制,目前库布齐沙漠植被覆盖度已达 53% 。乌兰布和沙漠流动沙丘和半固定沙丘所占面积较大,对该区域进行采样,主要研究沙漠粒径、矿物、风化程度等之间的相互作用关系。库布齐沙漠植被覆盖度较高,采样分析主要研究不同植被修复措施和修复时间对沙漠土壤组成的影响。

2.2 研究方法 在乌兰布和沙漠沿黄带的流动沙丘、半固定沙丘和固定沙丘区域进行采样,在南北约 80 km 的长度范围内共布设采样点 33 个,其中在 23 个采样点分别采集了表层($0\sim 20\text{ cm}$)、中层($20\sim 40\text{ cm}$)和底层($40\sim 60\text{ cm}$)的样本,在 10 个采样点采集了表层 $0\sim 5\text{ cm}$ 的沙样,共得到样本 79 个,以研究沙漠不同深度粒径特征、矿物组成、风化程度以及三者之间的相互作用关系。流动沙丘的采样点沿南北向沙漠沿黄带等间距分布,半固定沙丘和固定沙丘的采样点包含不同植被盖度和不同植被类型,采样位置以植被发育程度为控制因素。在研究生态修复与沙漠矿物风化程度的关系时,选择生态修复和治理工作开展较早的库布齐沙漠,通过在不同植被覆盖度、不同修复时间的区域进行表层采样,研究黏性矿物含量、风化程度与生态修复的响应关系。采样涵盖的植被类型包括杨树、沙枣、花棒、芦苇、沙柳、沙蒿、樟子松等,涵盖的修复措施包括芦苇沙障、玉米杆沙障、葵花杆沙障、沙柳沙障等,不同修复措施的时间跨度为 $2002\text{—}2016$ 年。共采集沙样 24 个,植被覆盖度范围 $4\%\sim 60\%$ 。所有野外采集的沙样用密封袋密封后带回实验室,采用激光粒度仪对采集到的沙样进行颗分测验,并委托河南省岩石矿物测试中心,通过X射线衍射分析进行矿物鉴定,得到沙样中各种矿物的含量。本次研究的主要研究区域以及乌兰布和沙漠和库布齐沙漠采样点分布见图1,图中绿色三角标记为不同植被盖度采样点,红色点标记为沙丘采样点。

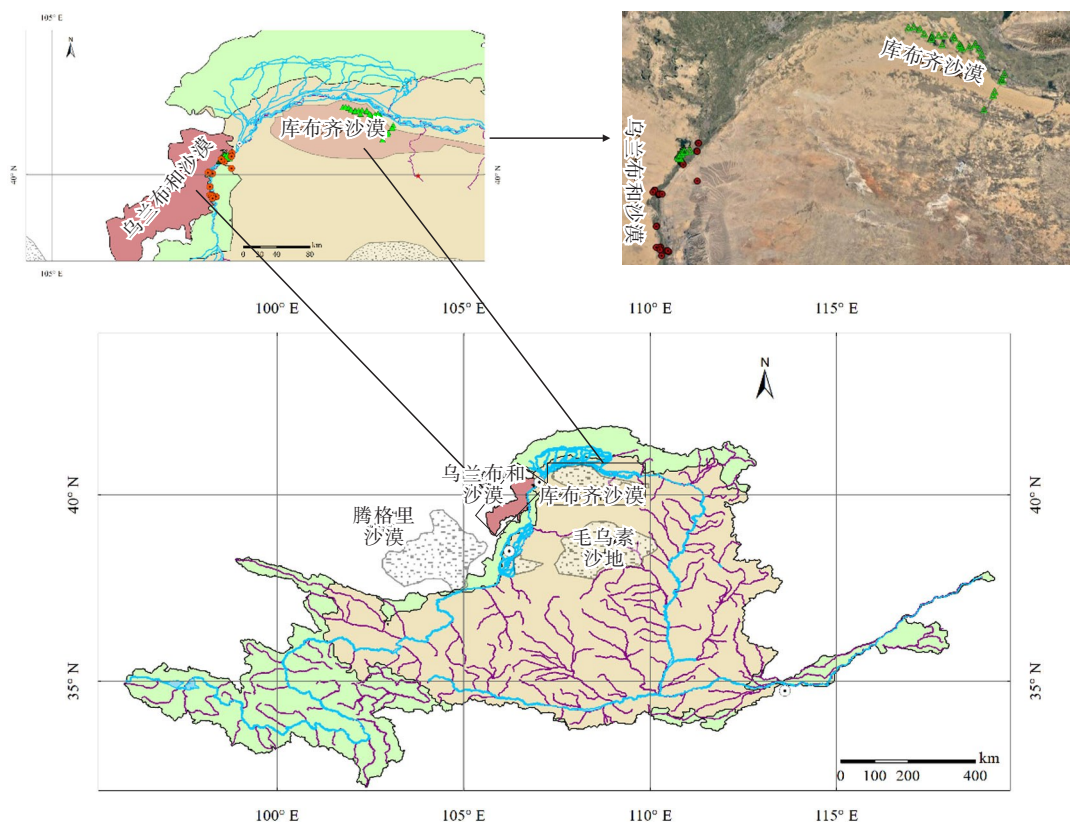


图1 沙漠采样点分布

3 沙漠粒径组成

表层、中层和底层沙样的粒径分布曲线见图2—图4，从图中可看出，表层沙的级配分布曲线较底层沙样平缓，表层沙样中小于0.1 mm和0.01 mm的颗粒含量明显高于底层沙样。表层、中层和底层沙样各粒径组的含量见表1。中层和底层沙样各粒径组含量相近，表层沙样大于1 mm和0.5 ~ 1 mm之间的颗粒含量显著低于中层和底层沙，小于0.05 mm和小于0.01 mm的颗粒含量显著高于中层和底层沙。

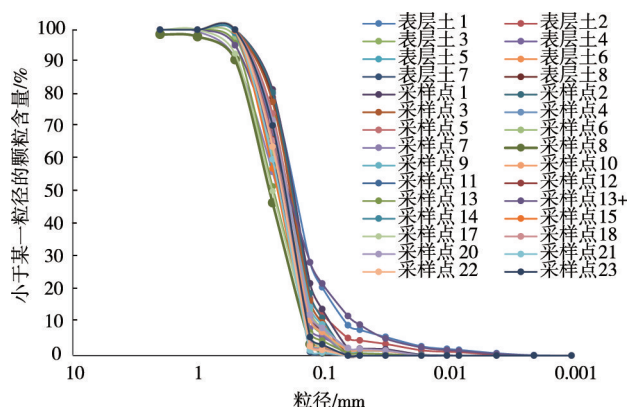


图2 表层样本颗粒级配曲线

流动沙丘、半固定沙丘和固定沙丘的中值粒径及分布见表2。流动沙丘和半固定沙丘沙样的中值粒径相差不大，固定沙丘各深度沙样的中值粒径显著小于流动沙丘和半固定沙丘。

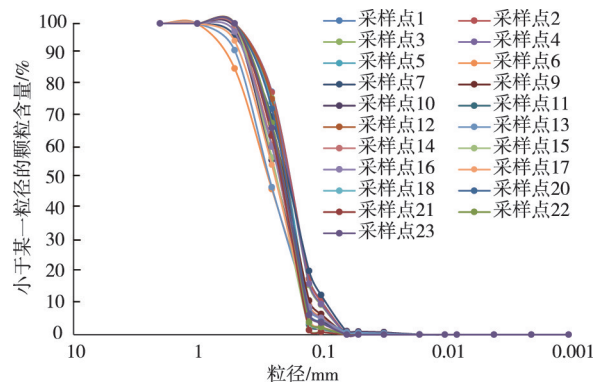


图3 中层样本颗粒级配曲线

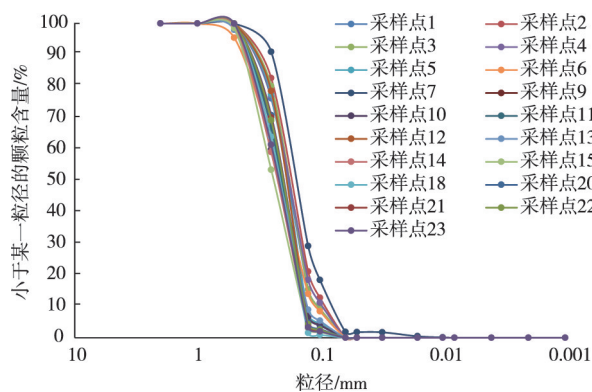


图4 底层样本颗粒级配曲线

表1 不同深度沙样各粒径组含量 (单位: %)

距地表深度	>1mm	1~0.5mm	0.5~0.25mm	0.25~0.1mm	0.1~0.05mm	0.05~0.01mm	<0.01mm
0~20cm	0.62	2.28	29.67	59.58	5.15	1.98	0.72
20~40cm	1.42	4.78	29.82	59.01	4.64	0.31	0.02
40~60cm	1.26	4.42	28.42	60.45	5.19	0.25	0.01

表2 各类型沙丘不同深度的中值粒径

	土地类型								
	流动沙丘			半固定沙丘			固定沙丘		
深度/cm	0~20	20~40	40~60	0~20	20~40	40~60	0~20	20~40	40~60
中值粒径/mm	0.235	0.224	0.221	0.225	0.226	0.228	0.191	0.195	0.196

4 沙漠矿物组成与风化程度

4.1 沙漠矿物组成 通过样本鉴定得到乌兰布和沙漠的矿物组成有石英、斜长石、钾长石、角闪石、方解石、白云石、云母、高岭石、绿泥石等。总体来看,黏性矿物含量垂向分布特征表现为表层>中层>底层,表层沙黏性矿物含量约为4.52%,中层为4.24%,底层为3.82%。表层沙长期暴露在外,受降雨、温度变化等外部环境影响较大,风化作用相对较强烈,促使非黏性矿物向黏性矿物转化。

流动沙丘、半固定沙丘和固定沙丘黏性矿物含量的垂向分布见图5。各类型沙丘区表层黏性矿物含量均高于中层和底层。流动沙丘表层同时受到风化作用和风蚀作用的影响,虽然在风蚀作用下损失一部分黏性颗粒,但总体上黏性颗粒含量仍高于中层和底层。固定沙丘各深度的黏性矿物含量均

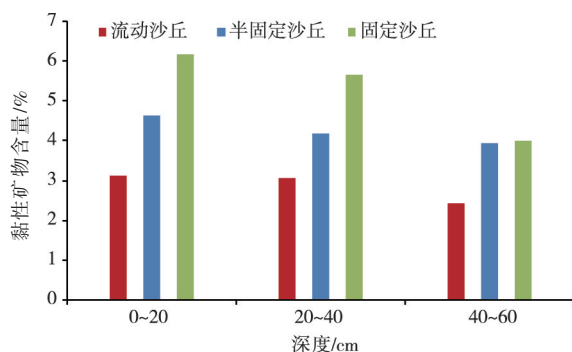


图5 各类型沙丘黏性矿物含量分布图

高于流动沙丘和半固定沙丘。不考虑分层的情况下，流动沙丘、半流动沙丘和固定沙丘的黏性矿物含量分别为3.12%、3.95%和6.18%，固定沙丘黏性矿物含量约为流动沙丘的2倍。

4.2 风化程度 风化作用是大多数黏性矿物形成的主要地质营力^[12]，石英和长石是土壤中最常见的矿物，在风化过程中，石英和长石的含量均有不同程度的减少，但前者慢而后者快。因此，常用石英/长石的比率来表征矿物的风化程度^[13]。各类型沙丘矿物风化程度的垂向分布见表3。流动沙丘、半固定沙丘和固定沙丘表层的风化程度较为接近，为1.63~1.64，但如前分析，固定沙丘黏性矿物含量却接近流动沙丘的2倍。沙漠表层沙除受到风化作用外，还受到风蚀作用，具有一定的分选性，较细颗粒被带走，留下较粗的颗粒^[25]，但受植被盖度的影响，流动沙丘和固定沙丘表层细颗粒的损失量不同。固定沙丘植被通过根系的生物化学作用在一定程度上促进了非黏性矿物的风化，同时，形成的黏性细颗粒在固定沙丘区域能够被较好地保存下来而不被风蚀掉。

表3 各类型沙丘不同深度的风化程度

深度	流动沙丘	半固定沙丘	固定沙丘
0~20cm	1.63	1.63	1.64
20~40cm	1.56	1.58	1.60
40~60cm	1.46	1.50	1.55

4.3 矿物组成与粒径及风化程度的关系

(1) 矿物组成与粒径的关系。黏土矿物的粒径范围从2~30 μm不等^[26]，一般情况下，粒径越小的颗粒中黏性矿物含量越高，因此，黏性矿物含量和中值粒径之间存在着一定的响应关系。在分析中发现，总体上随着黏性矿物含量的增加，沙样中值粒径呈减小趋势，绘制黏性矿物含量与中值粒径的关系图，见图6。二者具有较好的相关关系，其表达式如下(判定系数 R^2 为0.9041)：

$$S = -100.45d_{50}^2 - 38.25d_{50} + 17.36 \quad (1)$$

式中， S 为黏性矿物含量，%； d_{50} 为中值粒径，mm。

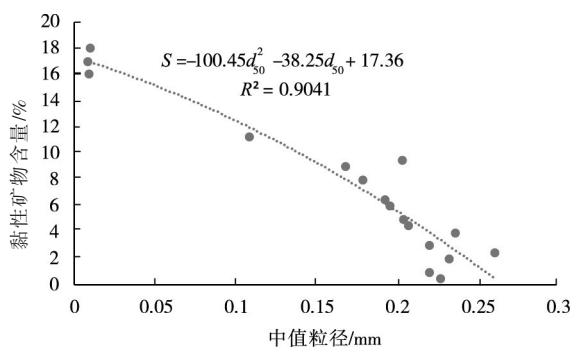


图6 黏性矿物含量与中值粒径的关系

(2)矿物成分与风化程度的响应关系。乌兰布和沙漠黏性矿物含量和风化程度的关系见图7，二者的拟合公式如下：

$$S = 5.85 \ln(I) + 1.637 \quad (2)$$

式中， S 为黏性矿物含量，%； I 为风化程度。

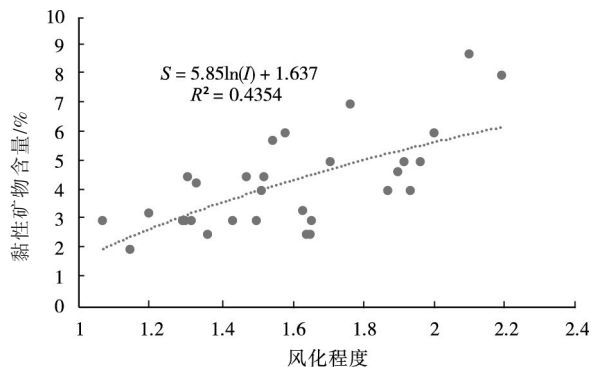


图7 黏性矿物含量与风化程度的关系

5 矿物风化与植被修复

5.1 植被修复对风化程度的影响 通过对乌兰布和沙漠和库布齐沙漠固定沙丘和半固定沙丘不同植被盖度沙样风化程度和矿物成分的鉴定和分析，得到植被修复对沙样风化程度和矿物组成的影响。

(1)风化程度与植被盖度。风化程度与植被盖度之间的关系见图8。风化程度与植被盖度的曲线上存在转折点，植被盖度小于18%~22%时，风化程度增加速率较大，当植被盖度大于18%~22%时，风化程度平缓增加，风化程度与植被盖度之间的关系式为：

$$I = 0.178 \ln(V) + 0.98 \quad (3)$$

式中， I 为风化程度； V 为植被盖度，%。

植被盖度与风化程度的关系表明，总体上，随着植被盖度的增加，植被一系列生物化学作用促进了覆盖区域沙土的风化。同时，风化程度的增加速率存在拐点，在植被盖度达到一定阈值后，风化程度的增加率变缓。本次研究得到的拐点对应的植被盖度的阈值为18%~22%，这一阈值应该与沙漠沙样特性、区域环境、降水、温度等各种影响因素相关，对于其他地区风化程度增速转折点对应的植被盖度，还有待于进一步深入研究。

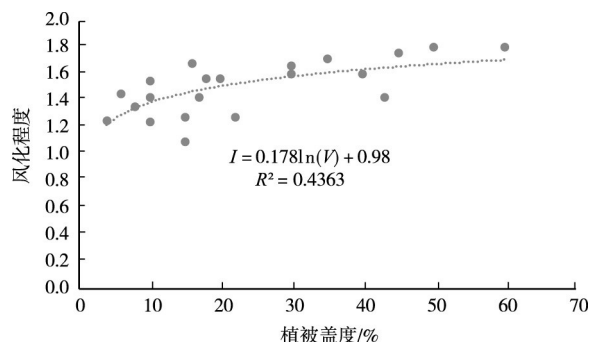


图8 风化程度与植被盖度之间的关系

(2)植被修复对矿物组成的影响。黏性矿物含量与植被盖度之间的关系见图9。随着植被盖度的增加，黏性矿物含量也逐渐增加，其中植被盖度自4%增加至18%~22%时，黏性矿物含量增加速率较快，之后增加速率减小，与植被盖度和矿物风化程度的关系曲线一致。黏性矿物含量与植被盖度之间的关系式为：

$$S = 4.18 \ln(V) - 3.12 \quad (4)$$

式中， S 为黏性矿物含量，%； V 为植被盖度，%。

图 10 给出了不同黏性矿物含量与植被盖度之间的关系，受植被影响较大的黏性矿物为伊利石，其次是绿泥石，高岭石与植被盖度之间的关系最弱，表明植被修复引起矿物成分的变化以伊利石含量的变化最为显著。根据文献研究成果，非黏性矿物在风化过程中，因土壤环境的不同，所形成的黏性矿物类型也不同^[13]，本次研究得到伊利石含量变化对沙漠植被修复的响应较为密切，初步分析和库布齐沙漠的土壤环境有较大关系。此外，本次研究得到的黏性矿物含量和风化程度变化转折点对应的植被盖度阈值 18% ~ 20%，与一些研究者提出的低覆盖度治沙中的植被盖度(15% ~ 25%)^[27]以及沙漠中植被分布面积或覆盖度应存在一个最适的比例^[28]等研究成果具有一定的一致性。

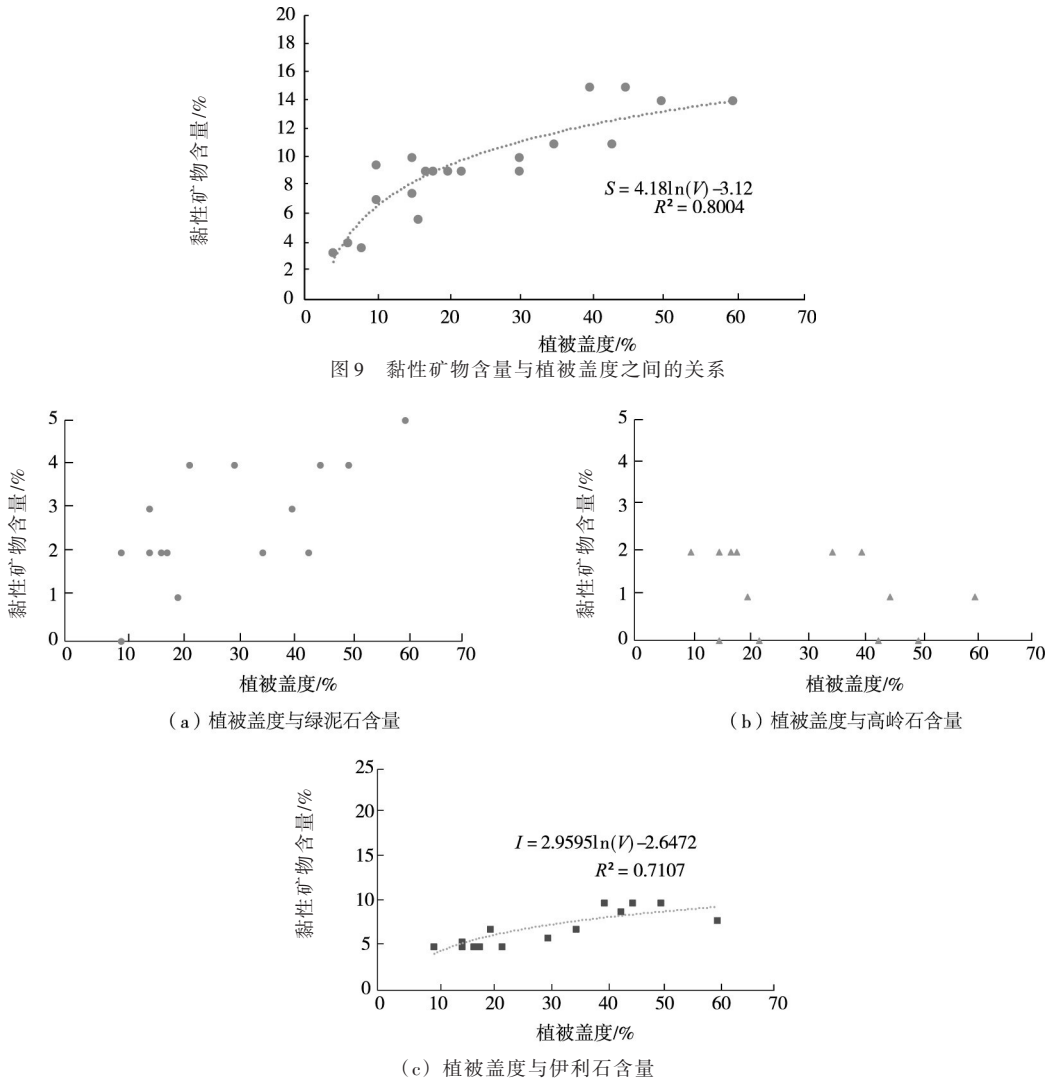


图 10 不同类型黏性矿物含量与植被盖度之间的关系

(3) 风化程度与植被修复时间。植被在生长发育过程中会不断促进矿物的风化作用，植被发育时间越长，相应地，其风化程度也越高。库布齐沙漠的生态修复工作起步较早，修复措施也相对较完善，在不同类型和不同年份修复措施区进行采样，分析其粒径和矿物组成特性。

沙漠生态修复时间与矿物风化程度之间的关系见图 11。生态修复时间越长，修复区域的矿物风化程度越高，表明植被修复对促进矿物风化有着显著的作用。通过分析修复时间与矿物成分的关系发现，黏性矿物中伊利石的含量与植被发育时间的关系较好，表明植被作用下能够促进黏性矿物中伊利石的形成。

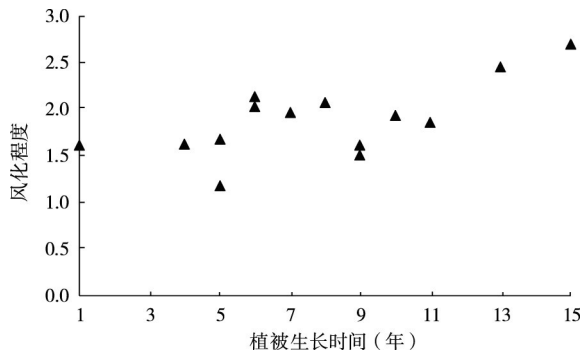


图 11 风化程度与植被发育时间之间的关系

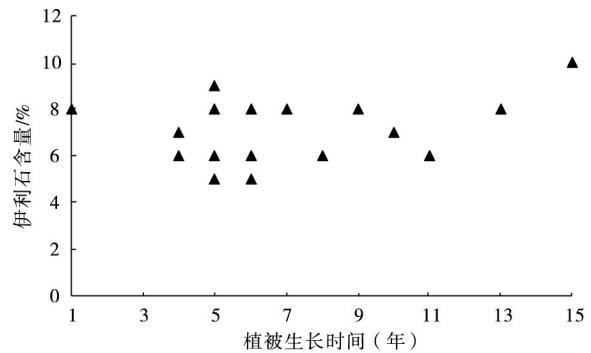


图 12 伊利石与植被发育时间之间的关系

表 4 不同类型修复措施修复时间与矿物风化程度

类别	修复年份	修复时间(年)	风化程度
樟子松	2007	10	1.93
樟子松	2008	9	1.51
樟子松	2012	5	1.18
沙柳沙障	2004	13	2.46
沙柳沙障	2011	6	2.23
沙柳沙障	2016	1	1.81
沙柳	2011	6	2.03
沙柳	2012	5	1.68
杨树	2002	15	2.77
杨树	2009	8	2.07
杨树	2010	7	1.97
芦苇($H=2\text{m}$)			1.65
芦苇($H=1.4\text{m}$)			1.62

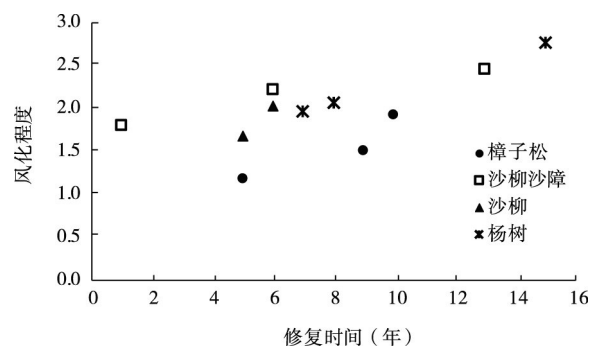


图 13 不同类型植被发育时间与矿物风化程度

同一种修复措施的修复时间与矿物风化程度之间的关系见表 4 和图 13。生长年限为 5 年的樟子松，其所在区域矿物风化程度为 1.51，生长年限为 10 年的樟子松，所在区域矿物风化程度为 1.93。沙柳沙障、沙柳、杨树等均表现出该特性。在平均高度为 2 m 的芦苇修复区域，风化程度略高于平均高度为 1.4 m 的芦苇区域。总体而言，生态修复时间越长，修复区域矿物风化程度也越高。

5.2 矿物风化与植被修复的互馈关系 风蚀是荒漠化地区土壤养分变异的重要驱动力^[29]，也是导致干旱半干旱地区土地沙漠化过程的首要因素^[30]。植被是影响风蚀的最活跃的因素之一^[31]，具有降低风速、阻止流沙前移、改善局部小气候等功能^[32]，植被密度和盖度影响空气动力学粗糙度^[33]，对风蚀具有明显的抑制作用^[34]，风蚀量与风力之间呈指数或幂函数增加^[35]，但随植被盖度的增加而呈指数函数减少^[36-37]。野外观测表明，当风速为 7.9 ~ 12.3 m/s 时，植被盖度为 20%、30% 和 40% 的区域，

其输沙率仅为流动沙丘的 36.6%、11.3% 和 6.6%^[38]。乌兰布和沙漠流动沙丘的起沙风速为 5.1 ~ 5.3 m/s^[38-39]，半固定沙丘和固定沙丘的起沙风速为 6.5 m/s 和 7.3 m/s^[40-41]。在沙漠采样期间发现，沙漠植被覆盖区域和植株之间的裸露区域的地表对比，植株之间的通道区域以及距植株较远的区域，其表层覆盖的颗粒明显较粗，而植株所在区域的颗粒明显较细，充分体现了植被抵抗风蚀、维持细颗粒含量的作用。

如前所述，沙漠的植被修复与沙漠颗粒的风化之间存在互馈关系，沙漠颗粒在经过风化作用后，黏性颗粒和黏性矿物含量增加，同时，受风蚀影响一部分黏性颗粒损失。但在一定植被覆盖的保护下，产生的黏性颗粒能够被有效地保护起来，为先锋物种发育提供条件。另一方面，植被发育过程中产生的一系列生物化学作用，能够促进植株所在区域土壤颗粒的风化程度，进一步促生黏土矿物和黏性颗粒，形成“风化 ~ 黏性颗粒(黏性矿物)增加 ~ 植被发育 ~ 促进风化”的良性循环。反之，如果风化程度较低，黏性颗粒含量较低，且没有植被覆盖，在风力作用下，大部分黏性颗粒将遭受损失，不利于先锋物种的发育和进一步的植被修复。植被修复和发育与矿物风化程度之间的互馈关系可用下图来表示，见图 14。

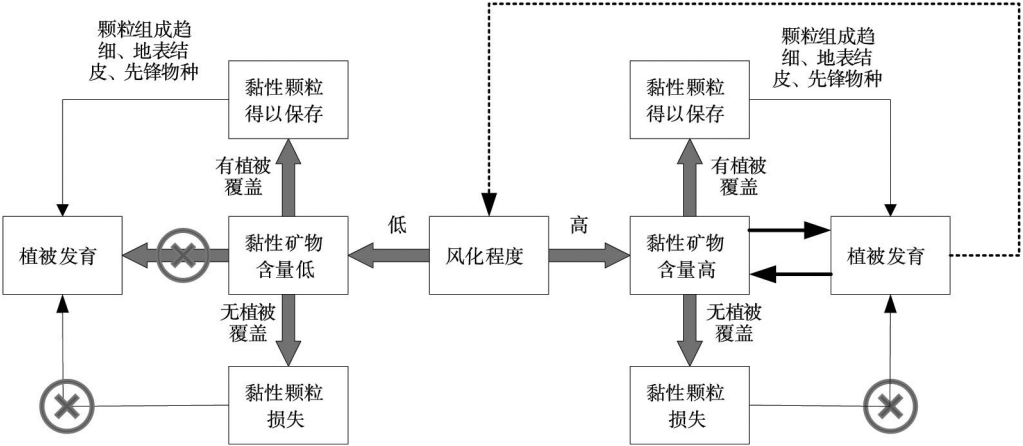


图 14 植被发育与风化程度间的互馈关系

6 结论

(1) 乌兰布和沙漠自表层至底层，粒径呈增加趋势。表层沙样大于 1 mm 和 0.5 ~ 1 mm 之间的颗粒含量低于中层和底层沙，小于 0.05 mm 和小于 0.01 mm 的颗粒含量高于中层和底层沙。自表层至底层，黏性矿物含量分别为 4.52%、4.24% 和 3.82%，固定沙丘黏性矿物含量约为流动沙丘的 2 倍。各类型沙丘表层风化程度高于中层和底层，固定沙丘表层的风化程度于流动和半固定沙丘。

(2) 沙漠粒径组成、风化程度、黏性矿物含量之间存在密切的相关关系。风化程度越高，黏性矿物含量越高，中值粒径越小。黏性矿物含量与中值粒径相关关系的判定系数达到 0.9 以上。

(3) 植被修复对风化程度和黏性矿物含量具有显著的影响，植被盖度越高且修复时间越长，风化程度和黏性矿物含量也越高。植被盖度由 4% 增加至 18%~22% 时，黏性矿物含量和风化程度增加速率较快，之后增加速率趋缓。黏性矿物中伊利石的含量与植被盖度和植被修复时间的关系最为密切。

(4) 除降雨、风力等气候条件外，土壤状况(黏性矿物含量)是影响沙漠生态修复的重要因素。自然状况下沙漠矿物风化、黏性矿物含量和植被发育的演变存在多种可能性，但通过人工固沙措施，可形成“风化-黏性颗粒(黏性矿物)增加-植被发育-促使风化”的良性循环过程。沙漠生态修复的关键在于通过一定的人工措施增加并稳定沙漠中黏性颗粒含量。

参 考 文 献:

- [1] YI Z J, ZHAO C H. Desert "soilization": an eco-mechanical solution to desertification[J]. Engineering, 2016, 2(3): 270-273.
- [2] 常茜, 鹿化煜, 吕娜娜, 等. 1992—2015年中国沙漠面积变化的遥感监测与气候影响分析[J]. 中国沙漠, 2020(1): 1-7.
- [3] 刘立超, 王伟红, 宋耀选, 等. 沙漠化过程与气候变化相互作用的研究进展[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2004(3): 197-202.
- [4] 薛娴, 王涛, 吴薇, 等. 中国北方农牧交错区沙漠化发展过程及其成因分析[J]. 中国沙漠, 2005(3): 320-328.
- [5] 王涛, 朱震达, 赵哈林. 我国沙漠化研究的若干问题——4. 沙漠化的防治战略与途径[J]. 中国沙漠, 2004(2): 3-11.
- [6] 王思如, 雷慧闯, 段利民, 等. 气候变化对科尔沁沙地蒸散发和植被的影响[J]. 水利学报, 2017, 48(5): 535-544.
- [7] 刘新平, 张铜会, 赵哈林, 等. 流动沙丘降雨入渗和再分配过程[J]. 水利学报, 2006, 37(2): 166-171.
- [8] 赵勇, 裴源生, 翟志杰. 分布式土壤风蚀模拟与应用[J]. 水利学报, 2011, 42(5): 554-562.
- [9] 闫德仁, 薛英英, 韩凤杰, 等. 沙漠生物土壤结皮国外研究概况[J]. 内蒙古林业科技, 2007(1): 39-42.
- [10] BOWKER M A. Biological soil crust rehabilitation in theory and practice: an underexploited opportunity[J]. Restoration Ecology, 2007, 15(1): 13-23.
- [11] GRAETZ R D, TONGWAY D J. Influence of grazing management on vegetation, soil structure and nutrient distribution and the infiltration of applied rainfall in a semi-arid chenopod shrubland[J]. Austral Ecology, 1986, 11(4): 347-360.
- [12] 张乃娴. 粘土矿物与风化作用[J]. 建材地质, 1992(6): 2-6.
- [13] 罗家贤, 马毅杰, 杨德勇, 等. 过渡性土壤的矿物风化和演变[J]. 土壤, 1994(5): 241-247.
- [14] 张永亮. 从乌海风口入手加速乌兰布和沙漠治理步伐[J]. 林业经济, 2008(12): 38-40.
- [15] 周景山. 乌兰布和沙漠地区白刺下沙土粒径分析[J]. 内蒙古林业调查设计, 2013(6): 37-40.
- [16] 侯仁之, 俞伟超. 乌兰布和沙漠的考古发现和地理环境的变迁[J]. 考古, 1973(2): 92-107.
- [17] 春喜, 陈发虎, 范育新, 等. 乌兰布和沙漠的形成与环境变化[J]. 中国沙漠, 2007(6): 927-931.
- [18] 马迎宾, 郝玉光, 黄雅茹, 等. 乌兰布和沙漠东北部绿洲边缘2种天然植被特征研究[J]. 林业资源管理, 2015(5): 76-80.
- [19] 朱雅娟, 贾志清, 卢琦, 等. 乌兰布和沙漠5种灌木的水分利用策略[J]. 林业科学, 2010(4): 15-21.
- [20] 马全林, 郑庆中, 贾举杰, 等. 乌兰布和沙漠沙蒿与油蒿群落的物种组成与数量特征[J]. 生态学报, 2012(11): 3423-3431.
- [21] 乌拉. 乌兰布和沙漠植被及其保护[J]. 陕西林业科技, 2007(4): 133-137.
- [22] 李智叁, 李凤日. 乌兰布和沙漠天然白刺种群及主要伴生种种间关联性研究[J]. 植物研究, 2008(1): 98-103.
- [23] 郭彩赞, 韩致文, 李爱敏, 等. 库布齐沙漠生态治理与开发利用的典型模式[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(1): 112-118.
- [24] 王博, 段玉玺, 王伟峰, 等. 库布齐沙漠东部不同生物结皮发育阶段土壤温室气体通量[J]. 应用生态学报, 2019, 30(3): 857-866.
- [25] 罗万银, 董治宝. 风蚀对土壤养分及碳循环影响的研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2005(4): 75-83.
- [26] 陈忠, 沈明道, 赵敬松, 等. 粘土矿物含量分析中的几个问题[J]. 沉积学报, 1998(1): 137-139.
- [27] 杨文斌, 王涛, 冯伟, 等. 低覆盖度治沙理论及其在干旱半干旱区的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(1): 1-5.
- [28] 李品芳, 李保国. 毛乌素沙地水分蒸发和草地蒸散特征的比较研究[J]. 水利学报, 2000(3): 26-30.
- [29] 脱登峰, 许明祥, 马昕昕, 等. 风水交错侵蚀条件下侵蚀泥沙颗粒变化特征[J]. 应用生态学报, 2014(2): 381-386.

- [30] 董光荣, 李长治, 金炯, 等. 关于土壤风蚀风洞模拟实验的某些结果[J]. 科学通报, 1987(4): 297-301.
- [31] CHEPIL W S, WOODRUFF N P, SIDDOWAY F H, et al. Vegetative and nonvegetative materials to control wind and water erosion[J]. Soil Science Society of America, 1963(1): 86-89.
- [32] 李得禄, 马全林, 张剑挥, 等. 乌兰布和沙漠梭梭林不同管护措施效果分析[J]. 草业科学, 2015(1): 132-137.
- [33] 董治宝, FRYREAR D W, 高尚玉. 直立植物防沙措施粗糙特征的模拟实验[J]. 中国沙漠, 2000(3): 29-32.
- [34] 张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 植被对土壤风蚀影响的风洞实验研究[J]. 水土保持学报, 2003(3): 31-33.
- [35] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区北部风沙区土地沙漠化综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [36] FRYREAR D W. Soil cover and wind erosion[J]. Transactions of the ASABE, 1985, 28(3): 781-784.
- [37] WASSON R J, NANNINGA P M. Estimating wind transport of sand on vegetated surfaces[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1986(5): 505-514.
- [38] 刘芳, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘地表风沙流结构特征[J]. 中国沙漠, 2014(5): 1200-1207.
- [39] 何京丽, 张三红, 崔巍, 等. 黄河内蒙古段乌兰布和沙漠入黄风积沙监测研究[J]. 中国水利, 2011(10): 46-48.
- [40] 王志刚. 乌兰布和沙漠东北部风沙灾害与防护林带参数探讨[J]. 中国沙漠, 1995(1): 79-83.
- [41] 李清河, 包耀贤, 王志刚, 等. 乌兰布和沙漠风沙运动规律研究[J]. 水土保持学报, 2003(4): 86-89.

Study on the mutualism between mineral composition and ecological restoration in desert area

TIAN Shimin¹, YUAN Yuliang², LI Jinrong³, WANG Yuanjian¹, JIANG Enhui¹

(1. Key Laboratory of Yellow River Sediment, Yellow River Institute of Hydraulic Research,
YRCC, Zhengzhou 450003, China;

2. Henan Water & Power Engineering Consulting Co., Ltd, Zhengzhou 450016, China;

3. Institute of Water Resources for Pastoral Area, MWR, Hohhot 010020, China)

Abstract: Taking Ulanbuh Desert and Kubuqi Desert as the research area, sand samples of 3 different surface depth (the surface layer: 0~20cm; the middle layer: 20~40cm; the bottom layer 40~60cm underground) were collected respectively from the fixed dune, semifixed dune and mobile dune from each desert to analyze the triadic relation between granulometric composition, mineral constituent and the degree of weathering. The relationship between the weathering level and cohesive mineral content and the desert ecological restoration was studied by sampling in different vegetation coverage area, and the mutualism relationship between the degree of mineral weathering and ecological restoration was revealed. The consequence shows that, the sand grain size in the surface level is smaller than the middle and bottom level; the higher the degree of weathering, the higher the cohesive mineral content and the smaller the grain size. There is a good relationship between the degree of mineral weathering and the cohesive mineral content. Their increase rate rises when the vegetation coverage rises from 4% to 18%~22%, and then the rate falls subsequently. It is a gradual growth of the ecological restoration followed by the degree of mineral weathering. For the Kubuqi Desert, the illite content in the cohesive mineral increased significantly with the growth of weathering and vegetation coverage level.

Keywords: desert; cohesive mineral; weathering; ecological restoration; mutualism

(责任编辑: 祁 伟)