

沙漠化逆转过程中毛乌素沙地土壤 风蚀可蚀性影响因子的变化特征

冯佳新^{1,2}, 王海兵^{1,2}, 刘茜雅^{1,2}, 刘红梅^{1,2}

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2.内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: [目的] 揭示毛乌素沙地沙漠化逆转过程对土壤风蚀可蚀性的影响, 为该区风蚀防治和生态重建提供科学参考。[方法] 选取1986—2021年共8期遥感影像, 以ENVI 5.3和ArcGIS 10.7为平台对毛乌素沙地不同时期土地沙漠化进行反演, 同时构建研究区2021年沙漠化差值指数(DDI), 并按照自然断裂法将毛乌素沙地土地分为非、轻度、中度、重度和极重度5种沙漠化类型代表沙漠化逆转的不同阶段。根据反演结果, 应用空间代替时间的方法, 对不同沙漠化类型土壤进行样品采集, 并对土壤机械组成、土壤有机质含量、土壤结皮、植被因子等土壤风蚀可蚀性影响因子进行测试分析。[结果] 毛乌素沙地1986—2021年沙漠化整体呈逆转趋势, 沙漠化土地面积由1986年的47 877.81 km² 缩减至2021年的45 914.06 km², 以56.11 km²/a的速率逆转。该区土地沙漠化可分为3个时期: 1986—2001年为沙漠化发展期, 土壤黏粒、粉粒百分含量、有机质含量呈降低趋势, 土壤砂粒百分含量、结皮因子和植被因子值呈增加趋势; 2001—2011年为沙漠化显著逆转期; 2011—2021年为沙漠化稳定逆转期, 逆转期内, 土壤黏粒、粉粒百分含量和有机质含量呈增加趋势, 土壤砂粒百分含量、结皮因子和植被因子值呈降低趋势, 且逆转程度越大, 各因子变化速率也越快; 随着沙漠化程度减弱, 土壤黏粒、粉粒百分含量、有机质含量呈线性增加趋势, 递增率分别为1.55%, 7.08%和1.98%, 土壤砂粒百分含量、结皮因子和植被因子值呈线性下降趋势, 递减率分别为8.62%, 0.13%和0.23%。[结论] 毛乌素沙地沙漠化逆转过程使土壤结构变细, 结皮发育, 植被增加, 土壤抗蚀性增强, 对土壤风蚀起到显著抑制作用。

关键词: 沙漠化逆转过程; 土壤风蚀; 可蚀性影响因子; 毛乌素沙地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)06-0001-09

中图分类号: S157.1

文献参数: 冯佳新, 王海兵, 刘茜雅, 等. 沙漠化逆转过程中毛乌素沙地土壤风蚀可蚀性影响因子的变化特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 1-9. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.001; Feng Jiaxin, Wang Haibing, Liu Xiya, et al. Characteristics of changes in factors influencing wind erosion and erodibility of soils in Mu Us sandland during desertification reversal [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 1-9.

Characteristics of Changes in Factors Influencing Wind Erosion and Erodibility of Soils in Mu Us Sandland During Desertification Reversal

Feng Jiaxin^{1,2}, Wang Haibing^{1,2}, Liu Xiya^{1,2}, Liu Hongmei^{1,2}

(1. College of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University,

Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Key Laboratory of Wind and Sand Physics and

Sand Control Engineering, Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: [Objective] The influences of the desertification reversal process on soil wind erosion in the Mu Us sandland were studied in order to provide a scientific reference for the prevention and control of wind erosion and for ecological reconstruction in this area. [Methods] A total of eight remote sensing images were selected

收稿日期: 2023-04-22

修回日期: 2023-05-30

资助项目: 内蒙古自治区科技重大专项“沙地生态系统近自然修复技术研究及产业化示范”(2019ZD007)

第一作者: 冯佳新(1998—), 男(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: 1721909609@qq.com。

通信作者: 王海兵(1982—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士研究生, 副教授, 主要从事干旱区地表风沙过程及荒漠化防治研究。

Email: hbwang@imau.edu.cn。

from 1986 to 2021, and ENVI 5.3 and ArcGIS 10.7 were used as the platform to invert the desertification of land in different periods in the Mu Us sandland. A desertification difference index (DDI) was constructed for the study area in 2021, and land in the Mu Us sandland was classified as non-, light, moderate, severe, and very severe desertification according to the natural fracture method. According to the inversion results, we applied the method of space instead of time to collect soil samples of different desertification types. We tested the soil samples and analyzed them for soil wind erosion erodibility influencing factors, such as soil mechanical composition, soil organic matter content, soil crust factor, and vegetation factors. [Results] The overall desertification of the Mu Us sandland tended to decline from 1986 to 2021, and the desertified land area shrank from 47 877.81 km² in 1986 to 45 914.06 km² in 2021 (a reversal rate of 56.11 km²/a). Desertification could be divided into three periods: 1986—2001 was the desertification development period that exhibited decreasing trends for soil clay, silt, and organic matter content, and increasing trends for soil sand content, soil crust factor, and vegetation factors; 2001—2011 was the period of significant desertification reversal; and 2011—2021 was the desertification stabilization period. During the reversal period, the percentage content of soil clay, silt, and organic matter showed an increasing trend, and the soil sand grain percentage content, soil crust factor, and vegetation factors showed a decreasing trend. The greater the degree of reversal, the faster the rate of change of the factors. As desertification degree weakened, the percentage content of soil clay, silt, and organic matter showed a linear increasing trend, with increasing rates of 1.55%, 7.08% and 1.98%, respectively. The values of soil sand grain percentage, crust factor, and vegetation factors showed a linear decreasing trend, with decreasing rates of 8.62%, 0.13% and 0.23%, respectively. [Conclusion] The reversal process of desertification in the Mu Us sandland caused soil structure to become finer, crusts to develop, vegetation to increase, and soil erosion resistance to increase, thereby significantly inhibiting wind erosion of soil.

Keywords: desertification reversal process; soil wind erosion; erodibility impact factor; Mu Us sandland

土壤风蚀是指在风的作用下造成沉积物的分离、搬运和沉积^[1],该过程发生缓慢,危害性较强,且影响因素较复杂^[2]。作为研究土壤风蚀规律的重要内容,土壤风蚀可蚀性表征着土壤对风蚀发展的敏感程度,是其研究的重要基础性内容,也是风蚀模型的必要输入参数之一^[3-4]。土壤风蚀可蚀性是一个综合的概念,受到土壤机械组成、土壤结皮、有机质含量、植被覆盖度等多种土壤理化性质的影响^[5]。其中,土壤的机械组成对土壤可蚀性的影响主要是由于不同粒径大小的土粒所需的起动风速大小不同,粒径越大,所需起动风速越大^[6];土地结皮能提高土壤强度和抗剪强度,防止风蚀物质的散布,对土壤保持有益^[7-8];土壤有机质作为土壤颗粒间的黏结物质,大大提高了土体的稳定性,能够增强土壤抗风蚀能力^[9];植被的存在降低了下垫面的风速^[10],此外,植被及其枯落物增加了地表粗糙度,增大了起动风速,同时对已起动的沙物质有一定的阻拦作用^[11]。早在 1942 年,美国学者 Chepil^[12-14]对土壤密度、团聚体稳定性、土壤有机质、土壤粒度组成等土壤风蚀可蚀性影响指标进行了科学有效的探索。由此,土壤风蚀可蚀性研究进入高潮,人们也意识到土壤性质对于风力侵蚀过程的重要

影响。荒漠化领域学者刘连友、董志宝等^[15-16]基于风洞模拟和野外监测,总结了土壤湿度、植被覆盖度等影响因子对土壤风蚀可蚀性的影响。毛乌素沙地土地贫乏,生态脆弱,极易遭受风沙灾害。自 20 世纪 50—60 年代,在各种防风固沙工程措施下,该区域沙漠化面积比例已由 20 世纪中期的 44.53% 逆转到目前的 6.76%,植被覆盖度不足 4% 增长到 71.38%,是沙漠化逆转的典型区^[17]。目前,已有学者对于沙漠化逆转过程对土壤可蚀性的影响做出相关研究。黄琬云等^[18]研究了退耕还林对黄土高原土壤可蚀性的影响,结果表明,退耕地土壤可蚀性呈现降低趋势;张雄一等^[19]定量评估了 2000—2019 年三北防护林体系建设工程区植被恢复程度及其对土壤风蚀的影响,研究结果表明,植被恢复程度较好有助于降低土壤风蚀模数。然而,对于毛乌素沙地沙漠化转向绿洲化的过程中单一点的土壤理化性质的变化研究相对匮乏。因此,本文通过植被覆盖指数和地表反照率构建毛乌素沙地沙漠化指数模型,定量反演 1986—2021 年沙漠化逆转过程,并通过空间代替时间的方法对毛乌素沙地不同沙漠化程度土壤机械组成、土壤有机质含量、土壤结皮、植被等土壤风蚀可蚀性影响因子指标

进行测试分析,阐明沙漠化逆转过程中土壤风蚀可蚀性变化特征。

1 研究区概况

毛乌素沙地位于北纬 $37^{\circ}27.5'—39^{\circ}22.5'$,东经 $107^{\circ}20'—111^{\circ}30'$,处于鄂尔多斯高原与黄土高原的过渡区。该地南至陕西榆林市长城一线,北达鄂尔多斯市沙圪堵镇,向西延伸至宁夏回族自治区盐池县,总面积达 $4.80 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。高处为剥蚀残丘,低处积水形成季节性湖泊,沙丘、滩地镶嵌,形成了毛乌素沙地特有的“梁滩相间”地貌景观^[20-21]。沙区年均温度 $8.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量 $250 \sim 440 \text{ mm}$,年均蒸发量 1800 mm ,沙地植被分为以油蒿 (*Artemisia ordosica*) 为主的沙地半灌木蒿类植被和以油松 (*Pinus tabulaeformis*)、樟子松 (*Pinus sylvestris*) 为主的人工林^[22]。毛乌素沙地土壤类型以草甸风沙土为主,沙地分布栗钙土、脱潮土、淡栗褐土、钙质粗骨土、淡栗钙土、新积土、红黏土、草甸风沙土、潮土、冲积土等 35 种土壤类型^[23]。

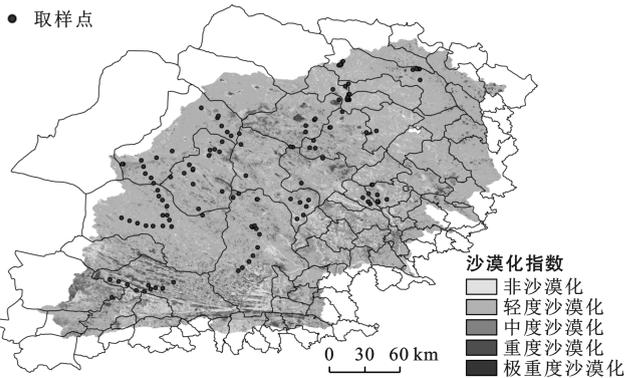


图 1 毛乌素沙地沙漠化状况及样点位置

Fig.1 Desertification status of Mu Us sandland and location of sample sites

2 材料与方法

2.1 遥感影像的获取及处理

基础数据包括 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011, 2016 和 2021 年共 8 期分辨率为 30 m 的 Landsat 影像,数据来源于美国地质勘探局 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>, 简称 USGS)。基于软件 ENVI 5.3 和 ArcGIS 10.7 对毛乌素沙地 1986—2021 年 8 期遥感影像进行几何校正、辐射定标、大气校正、镶嵌、裁剪等步骤^[24]。以每一个栅格为基准,通过 ROI 工具对毛乌素沙地的影像均匀布设 43 000 个连接点,构建沙漠化差值指数。通过野外实地调查,对构成的模型进行纠正、核实, kappa 系数均 > 0.90 , 满足试验要求。

2.2 研究方法

2.2.1 Albedo-NDVI 特征空间及沙漠化差值指数 参照已有文献^[25-26],选取 Albedo-NDVI 特征空间及沙漠化差值指数 (DDI) 对研究区沙漠化现状进行研究。其中,NDVI 为地表植被盖度,Albedo 为地表粗糙程度。利用研究区特征空间中的“干边散点”(各 NDVI 值所对应的 Albedo 最大值点)进行线性回归拟合,得到 Albedo-NDVI 特征方程及 DDI 计算公式。

$$\text{Albedo} = k_1 \cdot \text{NDVI} + c \quad (1)$$

$$\text{DDI} = -1/k_1 \cdot \text{NDVI} - \text{Albedo} \quad (2)$$

式中:Albedo 为归一化地表反照率;NDVI 为归一化植被指数;DDI 为沙漠化差值指数; k_1 为 Albedo 与 NDVI 拟合特征方程的斜率; c 为拟合产生的常数。

2.2.2 沙漠化指数 分别提取 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011, 2016 和 2021 年研究区对应点的 Albedo 及 NDVI 值,进行线性拟合,从而生成不同时段 Albedo-NDVI 特征方程,结果详见表 1。研究区不同时段 Albedo 与 NDVI 呈明显负相关,且各特征方程的 R^2 均大于 0.8,特征方程表现出较好的拟合性。

表 1 毛乌素沙地不同时期 Albedo-NDVI 特征方程
Table 1 Albedo-NDVI characteristic equations for different time periods of Mu Us sandland

年份	Albedo-NDVI 拟合特征方程	R^2
1986	$\text{Albedo} = -1.811 \times \text{NDVI} + 0.546$	0.835
1991	$\text{Albedo} = -1.841 \times \text{NDVI} + 0.513$	0.826
1996	$\text{Albedo} = -2.168 \times \text{NDVI} + 0.625$	0.876
2001	$\text{Albedo} = -1.855 \times \text{NDVI} + 0.558$	0.881
2006	$\text{Albedo} = -1.960 \times \text{NDVI} + 0.503$	0.828
2011	$\text{Albedo} = -2.267 \times \text{NDVI} + 0.572$	0.844
2016	$\text{Albedo} = -2.735 \times \text{NDVI} + 0.608$	0.891
2021	$\text{Albedo} = -9.050 \times \text{NDVI} + 0.813$	0.857

2.2.3 沙漠化程度的划分 基于统计学 Jenk 原理的自然断裂法^[27]将 1986—2021 年 8 期沙漠化解译影像 DDI 值划分为 5 个等级(表 2):非沙漠化、轻度沙漠化、中度沙漠化、重度沙漠化、极重度沙漠化。

2.2.4 不同沙漠化类型转换分析方法 为了解沙漠化类型在不同时段面积的变化关系,本文采用转移矩阵对其进行了分析。转换矩阵可用于分析沙漠化土地类型的转化情况,从而揭示其变化的方向^[28]。其计算公式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: S_{ij} 表示沙漠化土地类型 i 转为 j 的面积; n 为

沙漠化土地类型的总数; i, j 分别为研究初期和末期的沙漠化土地类型。本文采用 ArcGIS 10.7 空间统

计工具对数据进行处理, 并利用 Excel 2019 构建沙漠化土地面积变化转移矩阵。

表 2 毛乌素沙地 1986—2021 年土地沙漠化分级
Table 2 Classification of desertified land in Mu Us sandland during 1986—2021

沙漠化类型	沙漠化指数(DDI)							
	1986 年	1991 年	1996 年	2001 年	2006 年	2011 年	2016 年	2021 年
非沙漠化	>4.9	>4.7	>4.5	>4.4	>5.5	>6.2	>6.5	>7.0
轻度沙漠化	4.9~3.9	4.7~3.8	4.5~3.6	4.4~3.4	5.0~3.9	6.2~4.2	6.5~4.7	7.0~5.2
中度沙漠化	3.9~3.4	3.8~3.3	3.6~3.2	3.4~2.8	3.9~3.3	4.2~3.8	4.7~4.3	5.2~4.9
重度沙漠化	3.4~2.6	3.3~2.4	3.2~2.2	2.8~2.1	3.3~2.9	3.8~3.4	4.3~3.9	4.9~4.6
极重度沙漠化	<2.6	<2.4	<2.2	<2.1	<2.9	<3.4	<3.9	<4.6

2.3 样品采集

采样前对毛乌素沙地 2021 年遥感影像进行沙漠化反演(图 1), 随后根据反演结果, 采用时空转换的方法, 于 2021 年 5 月对毛乌素沙地不同沙漠化程度下地形平坦、裸露的地表土壤用五点取样法进行取样^[3], 同时对反演结果进行精度验证。采样深度为 0—5 cm, 利用 GPS 精准定位每个采样点的经纬度, 将每个样点的 5 个样品进行混匀, 共获得 370 个样品, 其中, 非沙漠化样品 47 个, 轻度沙漠化样品 121 个, 中度沙漠化样品 86 个, 重度沙漠化样品 77 个, 极重度沙漠化样品 39 个。取土后使用密封袋将样品带回实验室进行室内测定。每个采样点各选取 3 个典型植被样方, 取其平均值代表该样地植被盖度。草本植物的盖度使用垂直投影面积法确定, 灌木和乔木则通过多次测量冠幅尺寸确定。

2.4 风蚀可蚀性因子的指标测定及计算

2.4.1 土壤机械组成 土壤黏粒、粉粒、砂粒百分含量采用 Mastersizer 3000 激光粒度仪测定^[29]。不同颗粒大小的土壤所需的起风风速大小不同, 粒径越大, 所需起风风速越大^[6]。

2.4.2 结皮因子指标 土壤结皮可以在一定程度上增加表土强度^[7], 同时增加土壤的抗剪强度, 能够有效地抑制沙尘物质释放, 从而降低土壤风蚀^[8]。土壤结皮因子采用修正风蚀方程(RWEQ)中计算方法, 计算如公式为:

$$SCF=1/(1+0.0066Cl^2+0.021OM^2) \quad (4)$$

式中: SCF 为土壤结皮因子(无量纲); Cl 为土壤黏粒含量(g/kg); OM 为土壤有机质含量(g/kg)。

2.4.3 土壤有机质含量(OM) 采用重铬酸钾外加热法测定^[29]。土壤有机质作为土壤颗粒间的黏结物质, 极大提高了土体的稳定性, 能够增强土壤抗风蚀能力^[9]。

2.4.4 植被因子指标 植被对土壤风蚀具有重要影响, 主要是因为: ①植被的存在有效降低了下垫面的风速; ②植被及其枯落物有效增加了地表粗糙度和起风风速, 对已起动的沙物质有一定的阻拦作用^[10-11], 从而降低了土壤风蚀可蚀性, 且植被因子

(C) 越小, 植被盖度越高。植被因子采用修正风蚀方程(RWEQ)中计算方法, 计算公式为:

$$C=e^{-0.0438SC} \quad (5)$$

式中: C 为植被因子且 C 无量纲; SC 为植被覆盖度(%)。

2.5 数据分析

建立毛乌素沙地 2021 年各样点 DDI 与各可蚀性影响因子间的关系式, 利用 ENVI5.3 软件中的“Bandmath”工具, 将各关系式分别带入到 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011 和 2016 年沙漠化解译影像中, 得到各可蚀性影响因子在不同时期均值(表 4); 利用 Excel 2019 进行基础数据汇总、整理, 采用 Origin 2022 进行图形绘制。

3 结果与分析

3.1 毛乌素沙地沙漠化逆转特征

毛乌素沙地 1986—2021 年沙漠化土地面积变动趋势如图 2 所示。近 35 a 间毛乌素沙地沙漠化整体呈逆转趋势, 沙漠化土地面积由 1986 年的 47 877.81 km² 缩减至 2021 年的 45 914.06 km², 逆转速率为 56.11 km²/a。大体可分为 3 个阶段: ①1986—2001 年, 非沙漠化、轻度沙漠化土地逐渐减少, 中度、重度、极重度沙漠化土地面积持续增加, 沙漠化程度逐渐加剧。到 2001 年土地沙漠化发展到极限, 中度沙漠化面积最大, 达到 18 347.01 km², 重度、极重度沙漠化土地面积分别达到 13 526.81 和 2 322.01 km²; ②2001—2021 年沙漠化开始出现快速逆转状态, 轻、中、重度沙漠化土地面积比例变化较大, 尤其是 2001—2011 年, 非沙漠化、轻度沙漠化发展速率分别为 104.28 和 1 828.4 km²/a, 中度、重度、极重度沙漠化分别以 581.53, 1 176.55 和 174.59 km²/a 的速度逆转, 逆转效果显著; ③2011—2021 年, 呈现以轻度、中度沙漠化为主, 中度、重度、极重度沙漠化土地面积呈现逆转趋势, 非沙漠化、轻度沙漠化土地面积呈现发展趋势, 沙漠化呈现稳定逆转状态。

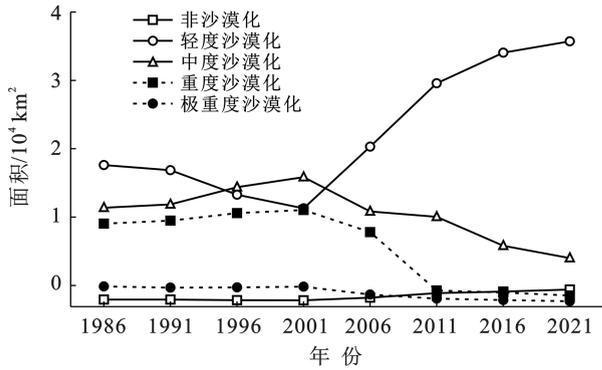


图 2 毛乌素沙地 1986—2021 年不同程度沙漠化面积变化趋势
Fig.2 Trend of different level desertified areas in Mu Us sandland during 1986—2021

3.2 不同沙漠化程度下土壤风蚀可蚀性影响因子变化特征

将所有样品按不同沙漠化程度平均分为 5 份,从

而得到毛乌素沙地不同沙漠化程度下土壤颗粒变动趋势(图 3),沙漠化差值指数(DDI)与黏粒、粉粒、砂粒百分含量变动趋势均符合线性分布规律,相关系数分别为 0.90,0.87,0.88。随着沙漠化程度的减弱,土壤黏粒和粉粒百分含量呈线性增加趋势,递增率分别为 1.55%和 7.08%,砂粒百分含量呈线性减小趋势,递减率为 8.62%,这说明随着沙漠化的逆转过程,土壤粒级组成越来越细。毛乌素沙地不同沙漠化程度下土壤可蚀性因子变动趋势如图 4 所示,DDI 与土壤结皮因子(SCF)、土壤有机质含量(OM)、植被因子(C)变动趋势均符合线性分布规律,相关系数分别为 0.95,0.99,0.77。随着沙漠化程度的减弱,土壤有机质含量(OM)呈线性增加趋势,递增率为 1.98%,土壤结皮因子(SCF)、植被因子(C)呈线性减小趋势,递减率分别为 0.13%和 0.23%。沙漠化逆转过程,能够使土壤有机质含量增加,结皮发育,植被增加。

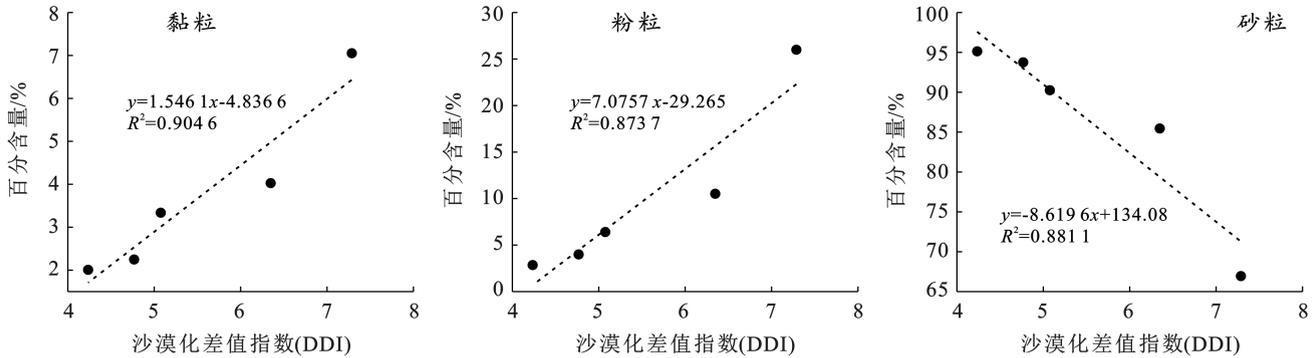


图 3 毛乌素沙地不同沙漠化程度下土壤颗粒百分含量变动趋势
Fig.3 Trend of soil particle content under different desertification levels in Mu Us sandland

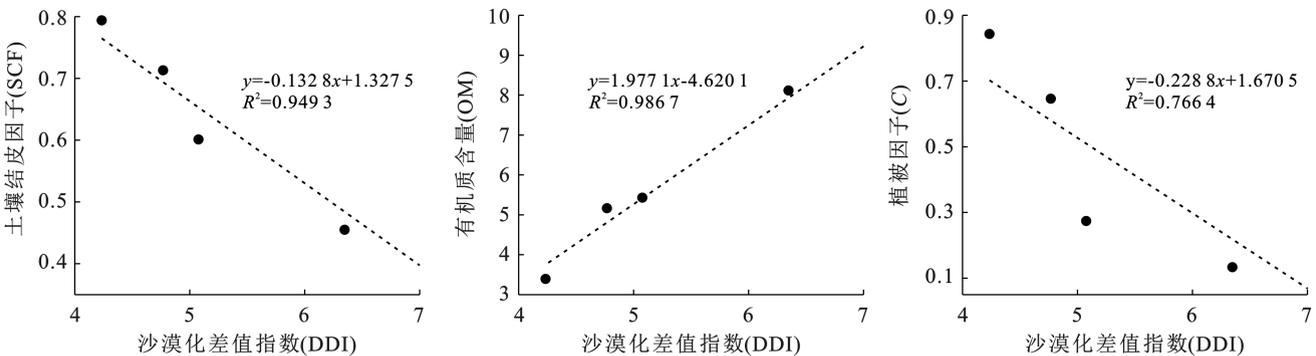


图 4 毛乌素沙地不同沙漠化程度下可蚀性因子变动趋势
Fig.4 Trend of erodibility factor under different desertification levels in Mu Us sandland

3.3 沙漠化土地及可蚀性影响因子不同时段整体变化趋势

弦图主要用于展示多个对象之间的关系,连接圆上任意两点的线段称之为弦,弦(两点之间的连线)就代表着两者之间的关联关系。弦图可以反映毛乌素

沙地土地沙漠化演变过程中不同沙漠化土地面积之间转换的数量和流向关系并进行可视化表达^[30],弦(连接线)的宽度越宽,表示不同沙漠化土地面积之间转换的数量越高。毛乌素沙地近 35 a 间的沙漠化土地面积转移情况如图 5 所示。

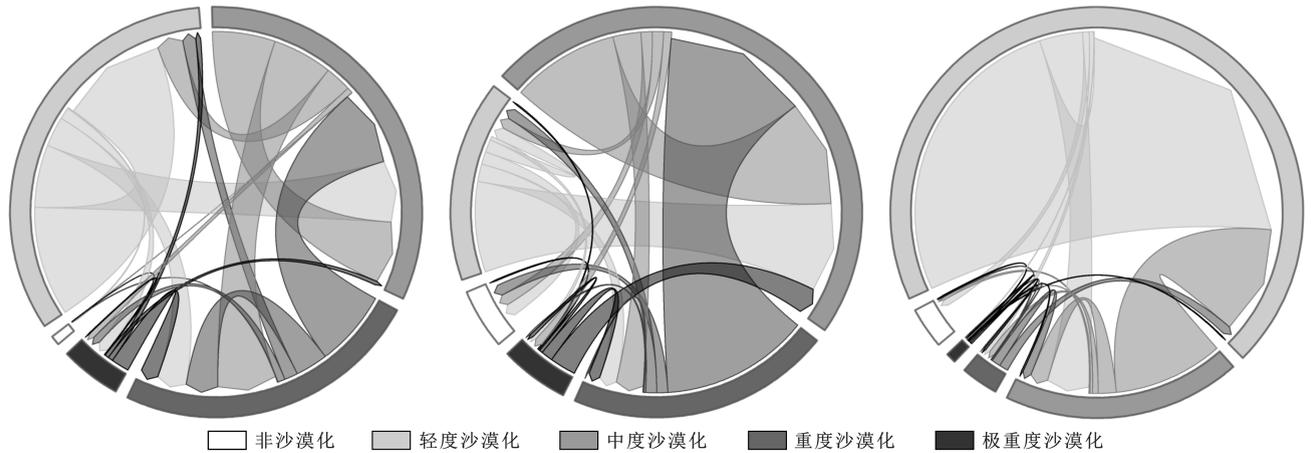


图 5 毛乌素沙地 1986—2021 年沙漠化演变的弦图可视化表达

Fig.5 Chordal graph visualization representation of desertification evolution in Mu Us sandlang during 1986—2021

由图 5 并结合表 3 可知,以 2001 和 2011 年为分界点,各沙漠化土地面积之间的转入和转出发生了较大的变化。1986—2001 年,毛乌素沙地极重度转为重度的面积最多,为 1 596.64 km²,占其总面积的 67.56%;其次是重度和中度沙漠化相互转换,其中,重度转中度的面积为 6 775.75 km²,中度转重度的面积为 5 313.09 km²,占各自类型总面积的比例分别是 58.71%,38.33%;轻度转中度的面积为 5 575.86 km²,占其总面积的 27.72%。2001—2011 年,受到“退耕

还林(草)工程”的影响,中、重、极重度沙漠化开始向轻度沙漠化转换,转移面积分别为 12 834.56, 8 725.83 和 906.51 km²,占各自类型总面积的比例分别是 69.95%,64.51% 和 39.04%。2011—2021 年,主要转移类型为中、重度沙漠化向轻度沙漠化的转变,转移面积分别为 9 898.22 和 804.04 km²,占各自类型总面积的比例分别是 78.99% 和 45.65%;其次是重度转为中度面积为 792.89 km²,占其总面积的 45.02%。

表 3 毛乌素沙地 1986—2021 年沙漠化土地面积转移矩阵

Table 3 Matrix of desertified land area transfer in Mu Us sandlang during 1986—2021

研究时段	沙漠化类型	非沙漠化	轻度沙漠化	中度沙漠化	重度沙漠化	极重度沙漠化
1986—2001 年	非沙漠化	158.53	86.42	78.67	75.87	30.43
	轻度沙漠化	87.35	9 734.97	5 575.86	2 665.65	1 048.11
	中度沙漠化	33.75	2 334.22	5 570.5	5 313.09	510.11
	重度沙漠化	38.53	1 189.09	6 775.75	2 875.56	662.1
	极重度沙漠化	7.49	441.55	346.23	1 596.64	71.26
2001—2011 年	非沙漠化	157.91	67.56	46.24	40.96	12.98
	轻度沙漠化	424.63	9 535.75	3 034.44	589.76	124.71
	中度沙漠化	376.75	12 834.56	3 609.23	934.71	271.76
	重度沙漠化	369.11	8 725.83	4 965.71	34.11	56.13
	极重度沙漠化	40.02	906.51	876.10	388.87	110.51
2011—2021 年	非沙漠化	886.88	265.53	132.31	56.32	27.38
	轻度沙漠化	590.36	2 7123.44	3 883.65	401.36	51.54
	中度沙漠化	236.23	9 898.22	1 615.65	505.17	89.10
	重度沙漠化	96.13	804.04	792.89	55.88	12.35
	极重度沙漠化	84.07	74.83	135.46	170.75	84.94

毛乌素沙地不同时期各指标均值详见表 4。由表 4 可知,1986—2001 年,土壤黏粒、粉粒、有机质含量分别以 0.03%/a,0.13%/a,0.03 g/(kg·a) 的速率减少,土壤砂粒含量、结皮因子、植被因子值分别以

0.16%/a,0.01/a,0.01/a 的速率增加;2001—2011 年,土壤黏粒、粉粒、有机质含量分别以 0.28%/a, 1.04%/a,0.33 g/(kg·a) 的速率增加,土壤砂粒含量、结皮因子、植被因子值分别以 1.32%/a,0.03/a,

0.03/a 的速率减少;2011—2021年,土壤黏粒、粉粒、有机质含量分别以 0.11%/a,0.52%/a,0.20 g/(kg·a) 的速率增加,土壤砂粒含量、结皮因子、植被因子值分别以 0.63%/a,0.01/a,0.02/a 的速率减少。可以看出,在沙漠化发展时期,土壤黏粒、粉粒、有机质含量

呈降低趋势,土壤砂粒含量、结皮因子、植被因子值呈增加趋势;沙漠化逆转时期,土壤黏粒、粉粒、有机质含量呈增加趋势,土壤砂粒含量、结皮因子、植被因子值呈降低趋势,且逆转程度越大,各因子变化速率也越快。

表4 毛乌素沙地 1986—2021年各指标均值

Table 4 Mean values of indicators in Mu US Desert during 1986—2021

年份	土壤黏粒/%	土壤粉粒/%	土壤砂粒/%	土壤结皮因子	有机质/(g·kg ⁻¹)	植被因子
1986	3.42	6.52	90.06	0.64	3.53	0.75
1991	3.22	6.04	90.85	0.68	3.31	0.78
1996	3.14	5.72	91.27	0.70	3.28	0.79
2001	3.01	4.57	92.42	0.71	3.04	0.81
2006	4.48	9.15	88.83	0.55	5.07	0.61
2011	5.79	14.97	79.24	0.44	7.36	0.48
2016	6.13	16.37	75.53	0.40	7.51	0.41
2021	6.88	20.21	72.91	0.37	8.38	0.32

4 讨论

DDI作为沙漠化指数,其值大小可以反映沙漠化程度的不同,DDI值越大,沙漠化程度越低^[31]。因此通过DDI可以有效区分研究区土地沙漠化程度的差异,实现时空的定量监测。张连伟等^[32]认为人类活动对局部地区的沙漠化逆转产生了重要影响。近40a间,我国陆续实施了“三北”防护林、京津风沙源治理、退耕还林、天然林保护等沙地沙漠化防治工程,同期毛乌素沙地沙化土地面积得到了很好的治理,部分地区出现了沙漠化逆转现象。随着区域生态环境的不断改善,人口数也呈不断增加趋势,对沙地农业发展需求增大,在沙漠化逆转过程中,耕地面积不断增大,农田防护林面积也随之增加^[33]。例如,1978年三北工程实施以来,地处沙地腹地的乌审旗累计完成建设任务 1.94×10^5 hm²,其中人工造林 1.67×10^5 hm²,飞播造林 2.27×10^4 hm²,封沙育林4700 hm²,森林覆盖率由1978年的6.9%增加到2000年的18.62%^[34]。三北防护林工程启动后,毛乌素沙地樟子松造林面积达到 2.00×10^5 hm²以上。樟子松的出现不仅增强了防风固沙效益,还显著提高了生物多样性,林种结构及林分质量得到改善^[35]。1990年代末,在各种造林技术运用下,如人工造林、机械造林、飞播造林,毛乌素沙地的沙漠化发展得到遏制^[36]。但是由于工程实施的不均匀性和过去游牧民族习惯的散养游牧、开荒等传统生产方式一直没有改变,加上存在过度放牧、滥垦乱伐等现象,毛乌素沙地生态建设曾一度陷入边治理边破坏的局面。例如,1986—2000年,伊金霍洛旗沙地面积新增17820 hm²^[37];1996年,鄂托克前旗

沙生植物后期因耗水引起地下水下降,造成林木生长停滞^[38]。2001—2010年期间,在西部大开发和国家重点林业工程项目的大力支撑下,毛乌素沙地严格执行了禁牧、休牧和轮牧政策。2009年以后,毛乌素沙地开始种植樟子松、油松等树种,此外还种植约2000 hm²沙棘、枣树和山杏。2016年,在毛乌素沙地的宁夏盐池县营造生态固沙林 8.70×10^5 hm²,治理沙漠化土地 2.55×10^5 hm²,使 1.13×10^5 hm²流动、半流动沙丘变为绿洲,有效保护草原 4.50×10^6 hm²,遏制了毛乌素沙地南移。2020年,鄂尔多斯市鄂托克前旗昂素镇采取“滴灌”种柠条来治理沙地,效果显著^[39]。

土壤的机械组成对土壤风蚀可蚀性影响较大^[8,40],主要是由于不同颗粒大小的土壤所需的起动风速大小不同,粒径越大,所需起动风速越大,且长期风蚀造成土壤中细颗粒物含量降低,地表粗化、沙化甚至砾石化^[6]。本文研究结果,随着毛乌素沙地系统重建,沙漠化开始向绿洲化发展,在此过程中,土壤黏粒、粉粒呈增加趋势,土壤砂粒含量呈减小趋势,且沙漠化逆转程度越大,其含量变化得越快。钱洲等^[41]人采用时空转换的方法揭示了毛乌素沙地乌审旗植被恢复过程中土壤性质变化特征,结果表明,植被恢复过程会使土壤细粒化;陈小红等^[42]研究认为土壤细粒结构的加强是沙漠化逆转的主要结果。这与本文研究结果相似,究其原因,沙漠化逆转程度实质上就是植被恢复程度^[43],毛乌素沙地在植被恢复的同时,会有效减少土壤风蚀作用^[44],且随着地表枯枝落叶覆盖度的增加,不仅提升了对表层土壤的保护作用,还为土壤微生物群落能量来源提供了平台,从而使得微生物能够活化土壤结构,细化土壤颗粒组

成^[45],是促使沙漠化逆转的一种有效措施,且由于土壤中细颗粒的增加,土壤砂粒含量则相对降低。

土壤结皮可以在一定程度上增加表土强度^[7],同时增加土壤的抗剪强度,能够有效地抑制沙尘物质释放,从而降低土壤风蚀^[8]。土壤有机质作为土壤颗粒间的黏结物质,大大提高了土体的稳定性,能够增强土壤抗风蚀能力^[9]。本研究结果表明毛乌素沙地沙漠化向绿洲化发展过程中,土壤结皮因子(SCF)值呈减小趋势,有机质含量(OM)呈增加趋势。赵哈林和郭铁瑞等人^[46-47]研究了科尔沁沙地植被恢复过程对土壤结皮的影响,结果表明,人工林的建设有利于流动沙地土壤结皮的形成、发育,并且人工林生长发育的同时,土壤结皮覆盖度、厚度、硬度明显增加。苏永中和赵哈林^[48]研究了科尔沁沙化草地持续放牧和围封恢复下土壤系统的碳贮存,结果表明,沙化草地在采取有效的保护措施后,可以增加其碳汇的容量,本研究结果与其相似。由于早期毛乌素沙地风沙活动强烈,表土稳定性差,因此一般不会形成土壤结皮,而在经过植被恢复过程使地表风沙活动减弱表土趋于稳定后沙面上就会逐步形成土壤结皮^[49],这是因为随植被恢复过程,能够减少土壤有机质在迁移过程中造成的损失^[41],且土壤中微生物群落使生物土壤结皮的发育更为有利^[45,50]。已有研究^[51]证实流沙经植被恢复后沙面逐步形成结皮。

5 结论

(1) 近 35 a 间,毛乌素沙地沙漠化整体呈逆转趋势,沙漠化土地面积由 1986 年的 47 877.81 km² 缩减至 2021 年的 45 914.06 km²,以每年 56.11 km² 的速率逆转;实施一系列工程对毛乌素沙地生态系统重建成效明显。1986—2021 年沙漠化逆转过程中土壤可蚀性影响因子时间变化特征为:1986—2001 年土壤黏粒、粉粒百分含量和有机质含量呈降低趋势,土壤砂粒百分含量、结皮因子和植被因子值呈增加趋势;2001—2021 年土壤黏粒、粉粒百分含量和有机质含量呈增加趋势,土壤砂粒百分含量、结皮因子和植被因子值呈增加趋势。

(2) 随着沙漠化程度减弱,毛乌素沙地土壤黏粒、粉粒百分含量、有机质含量呈线性增加趋势,递增率分别为 1.55%、7.08% 和 1.98%,土壤砂粒百分含量、结皮因子和植被因子值呈线性下降趋势,递减率分别为 8.62%、0.13% 和 0.23%。显然,毛乌素沙地沙漠化逆转过程使土壤结构变细、结皮发育、植被增加,土壤抗蚀性增强,对土壤风蚀起到显著抑制作用。

[参 考 文 献]

- [1] 翟辉,李国荣,李进芳,等.黄河源鼠害退化区鼠丘土壤的风蚀特征[J].水土保持通报,2022,42(6):97-105.
- [2] 李斌鹏,陈新闻,董智,等.不同土壤水分条件对内蒙古荒漠草原地表风蚀影响的风洞模拟研究[J].干旱区资源与环境,2022,36(9):126-132.
- [3] 王佳庭,于明含,杨海龙,等.乌兰布和沙漠典型植物群落土壤风蚀可蚀性研究[J].干旱区地理,2020,43(6):1543-1550.
- [4] 王仁德,安晨宇,苑依笑,等.不同时间尺度下农田土壤风蚀可蚀性的变化[J].中国沙漠,2021,41(5):202-209.
- [5] Dai Yujie, Tian Luo, Zhu Pingzong, et al. Dynamic aeolian erosion evaluation and ecological service assessment in Inner Mongolia, Northern China [J]. Geoderma, 2022,406(4):115518.
- [6] 邢春燕,郭中领,常春平,等. RWEQ 模型在河北坝上地区的适用性[J].中国沙漠,2018,38(6):1180-1192.
- [7] Zhu Guangyu, Tang Zhuangsheng, Shangguan Zhouping, et al. Factors affecting the spatial and temporal variations in soil erodibility of China [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2019,124(3):737-749.
- [8] 张越,陈思宇,毕鸿儒,等.干旱半干旱区农田土壤风蚀特征及参数化研究进展[J].中国沙漠,2022,42(3):105-117.
- [9] 麻虹宇,李保国,蔡斌,等.干旱半干旱区地表覆盖对土壤风蚀的影响[J].水土保持研究,2023,30(2):29-35.
- [10] 李晓原,张文太,李建贵,等.伊犁河谷沟壑区坡面尺度地形、植被与土壤性质的相互关系[J].新疆农业大学学报,2016,39(6):477-482.
- [11] 邢恩德,马少薇,郭建英,等.植被盖度对典型草原区地表风沙流结构及风蚀量影响[J].水土保持研究,2015,22(6):331-334.
- [12] Chepil W S. Measurement of wind erosiveness of soils by the dry sieving procedure [J]. Scientific Agriculture, 1942,23(3):145-160.
- [13] Chepil W S. Properties of soil which influence wind erosion; I. the governing principle of surface roughness [J]. Soil Science, 1950,71(2):141-154.
- [14] Chepil W S. Measurement of wind erosiveness of soils by dry sieving procedure [J]. Scientific Agriculture, 1942,23(3):145-160.
- [15] 刘连友,王建华,李小雁,等.耕作土壤可蚀性颗粒的风洞模拟测定[J].科学通报,1998,43(15):1663-1666.
- [16] 董治宝,陈渭南,李振山,等.植被对土壤风蚀影响作用的试验研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(2):1-8.
- [17] Wu Bo, Ci Longjun. Landscape change and desertification development in the Mu Us sandland, Northern China [J]. Journal of Arid Environments, 2002,50(3):

- 429-444.
- [18] 黄琬云,赵允格,刘宝元,等.黄土高原土壤可蚀性对退耕还林(草)的响应[J].水土保持学报,2023,37(4):94-100.
- [19] 张雄一,邵全琴,宁佳,等.三北工程区植被恢复对土壤风蚀的影响及植被恢复潜力研究[J].地球信息科学学报,2022,24(11):2153-2170.
- [20] Zhang Xinshi. Principles and optimal models for development of Maowusu sandy grassland [J]. Acta Phytocologica Sinica, 1994,18(1)1-16.
- [21] 段民福,廖超英,孙长忠,等.毛乌素沙地樟子松人工林土壤物理性质的时空变异规律[J].西北农业学报,2012,21(3):188-192.
- [22] 杜忠潮,宁建宏,惠镇江.长城沿线毛乌素沙地形成、扩展及其荒漠化效应[J].水土保持研究,2006,13(3):226-228,232.
- [23] 乔硕.毛乌素沙地绿洲化过程中生态系统结构及功能价值演变[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
- [24] 王涛,吴薇.我国北方的土地利用与沙漠化[J].自然资源学报,1999,14(3):355-358.
- [25] 张宁,常学礼,孙小艳,等.基于沙漠化程度和 NDVI 指数的奈曼旗生态安全评价[J].生态学杂志,2010,29(6):1250-1256.
- [26] 曾永年,向南平,冯兆东,等. Albedo-NDVI 特征空间及沙漠化遥感监测指数研究[J].地理科学,2006,26(1):75-81.
- [27] 毋兆鹏,王明霞,赵晓.精河流域 1990—2011 年土地荒漠化变化研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(1):192-197.
- [28] 杨靖,戴君虎,姚华荣,等.1992—2020 年横断山区植被分布与植被活动变化[J].地理学报,2022,77(11):2787-2802.
- [29] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版,北京:中国农业出版社,2001.
- [30] 曲衍波,王世磊,朱伟亚,等.黄河三角洲国土空间演变的时空分异特征与驱动力分析[J].农业工程学报,2021,37(6):252-263,309.
- [31] 邹明亮,韩雅敏,曾建军,等.基于 Albedo-NDVI 特征空间的玛曲县荒漠化时空动态监测[J].冰川冻土,2019,41(1):45-53.
- [32] 张连伟,郎洁,李莉.中国古代沙质荒漠化的历史演变[J].干旱区地理,2018,41(6):1270-1277.
- [33] 豆天宝.三北防护林典型工程区对生态环境的影响效应研究[D].甘肃 兰州:西北师范大学,2022.
- [34] 潘迎珍,刘冰,李俊.毛乌素沙地“十一五”综合治理研究[J].林业经济,2006(7):15-17.
- [35] 赵子夜.中国“三北”防护林工程建设现状及思考[J].南京林业大学学报(人文社会科学版),2018,18(3):67-76,89.
- [36] 弓晓倩,姚林杰,张佳宁,等.毛乌素沙地不同飞播造林年限土壤真菌群落结构特征[J].生态学杂志,2022,41(1):90-97.
- [37] 刘爱民,刘玉平,慈龙骏.毛乌素沙区的气候变化及人为活动特征分析[J].干旱区资源与环境,1996(4):8-18.
- [38] 高尚武.西北水土资源开发要遵守自然规律[J].林业科学,2000,36(5):6-7.
- [39] 呼东方.治理毛乌素:人进沙退七十年[J].新西部,2022,551(4):32-38.
- [40] 张杰铭.华北北部典型区域土壤风蚀与扬尘过程及其耦合机制研究[D].北京:北京林业大学,2020.
- [41] 钱洲,俞元春,俞小鹏,等.毛乌素沙地飞播造林植被恢复过程土壤酶活性的变化[J].水土保持研究,2014,21(6):95-100.
- [42] 陈小红,段争虎,雒天峰,等.沙漠化逆转过程中不同粒组颗粒养分与全土养分的关系[J].干旱区研究,2013,30(6):992-997.
- [43] 齐雁冰,常庆瑞,刘梦云,等.荒漠化土壤对人工植被恢复工程的响应[J].干旱地区农业研究,2011,29(3):180-185,198.
- [44] 刘树林,王涛,屈建军.浑善达克沙地土地沙漠化过程中土壤粒度与养分变化研究[J].中国沙漠,2008,28(4):611-616.
- [45] 张成霞,南志标.不同放牧强度下陇东天然草地土壤微生物三大类群的动态特征[J].草业科学,2010,27(11):131-136.
- [46] 赵哈林,郭轶瑞,周瑞莲,等.人工林建设对沙地土壤结皮发育及其表土理化特性的影响[J].水土保持学报,2010,24(1):202-207.
- [47] 郭轶瑞,赵哈林,赵学勇,等.科尔沁沙地结皮发育对土壤理化性质影响的研究[J].水土保持学报,2007,88(1):135-139.
- [48] 苏永中,赵哈林,李玉霖.放牧干扰后自然恢复的退化沙质草地土壤性状的空间分布[J].土壤学报,2004,41(3):369-374.
- [49] 周虹,刘云祥.高寒沙区土壤结皮对浅层土壤理化性质的影响[J].干旱区资源与环境,2022,36(8):154-160.
- [50] Tang Zhuangsheng, An Hui, Shangguan Zhouping. The impact of desertification on carbon and nitrogen storage in the desert steppe ecosystem [J]. Ecological Engineering, 2015,84:92-99.
- [51] 王逸敏.固沙沙障对植被、土壤和生物土壤结皮的影响[D].陕西 西安:西北大学,2018.