网络出版时间:2026-03-13　　DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.09.014

阴山北麓荒漠草原沙漠化与土壤粒度关系研究

刘茜雅[1,2],王海兵[3],赵天启[1,2],杨智博[4],吴迪[3]

(1 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站,内蒙古 呼和浩特 010020;2 中华人民共和国水利部 牧区水利科学研究所,内蒙古 呼和浩特 010020;3 内蒙古农业大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010018;4 巴彦淖尔市水利事业服务中心,内蒙古 巴彦淖尔 015000)

[摘　要] 【目的】研究阴山北麓荒漠草原沙漠化特征及时空演变规律,并分析了沙漠化对土壤粒度的影响,旨在为阴山北麓荒漠草原区土地沙漠化防治和生态恢复实践提供科学依据。【方法】以内蒙古阴山北麓为研究区,基于Landsat遥感影像特征以及290个土壤样品,研究了该地区2000－2024年土地沙漠化的时空分布和变化趋势,并分析了不同沙漠化程度地表土壤颗粒的粒度特征与分形特征。【结果】2000－2024年,阴山北麓区域荒漠草原地表沙漠化程度分为未沙漠化以及轻度、中度、重度、极重度沙漠化5级。随着时间推移,沙漠化程度总体呈下降趋势,其中西北部地表的沙漠化程度明显高于东南部;沙漠化面积总体表现为减小趋势,其中未沙漠化、重度沙漠化面积变化幅度较大。荒漠草原地表土壤组分均以细沙组分为主,其在不同沙漠化程度地表土壤含量为24.78%～41.08%;易风蚀土壤颗粒粒径主要为0.08～0.1和0.7～1 mm。未沙漠化以及轻度、中度、重度和极重度沙漠化程度的土壤颗粒平均粒径分别为0.18,0.24,0.28,0.42,0.97 mm,分形维数平均值分别为2.82,2.73,2.74,2.70和2.52。分形维数与沙漠化指数呈显著的负相关关系(R^2=0.748),可知分形维数值越小,地表沙漠化程度越严重。【结论】土壤粒度及分形维数等参数均显示阴山北麓荒漠草原沙漠化程度有所缓解,但表层土壤风蚀颗粒趋向粗粒化方向发展。

[关键词] 沙漠化;土壤粒度;分形维数;荒漠草原;阴山北麓

[中图分类号] S157.1　　[文献标志码] A　　[文章编号] 1671-9387(2026)09-0141-10

Relationship between desertification and soil grain size in desert grassland at the northern foot of Yinshan Mountains

LIU Xiya[1,2], WANG Haibing[3], ZHAOTianqi[1,2], YANG Zhibo[4], WU Di[3]

(1 *Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station, Hohhot, Inner Mongolia* 010020, *China*; 2 *Institute of Pastoral Hydraulic Research, Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Hohhot, Inner Mongolia* 010020, *China*; 3 *Inner Mongolia Agriculture University, State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 4 *Bayannur Municipal Water Conservancy Service Center, Bayannur, Inner Mongolia* 015000, *China*)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to study the characteristics and spatiotemporal dynamics of desertification in the the northern foot of the Yinshan Mountains, and its influence on soil grain size, providing a scientific basis for land desertification control and ecological restoration in the northern foot of Yinshan Mountains. 【Method】 In the northern foot of Yinshan Mountains in Inner Mongolia, based on the Landsat remote sensing image features and 290 soil samples, spatiotemporal distribution and change trends of land desertification from

[收稿日期] 2025-06-20　　[修回日期] 2025-07-23

[基金项目] 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项项目(MKYW2024JK022);内蒙古自治区自然科学基金项目(2025QN04035)

[作者简介] 刘茜雅(1995－),女,内蒙古呼和浩特人,博士,主要从事干旱区地表风沙灾害过程及防沙治沙研究。E-mail:imaulxy@163.com

[通信作者] 王海兵(1982－),男,内蒙古乌兰察布人,博士,主要从事干旱区地表风沙灾害过程及防沙治沙研究。E-mail:hbwang@imau.edu.cn

2000 to 2024 were studied, and the particle size characteristics and fractal characteristics of surface soil particles in areas with different desertification degrees were also analyzed. 【Result】 From 2000 to 2024, the degree of desertification of desert grassland in the northern foot of Yinshan Mountains was divided into five levels: non-desertified, mild, moderate, severe and extremely severe. Over this period, the degree of desertification generally showed a downward trend, with significantly higher levels in the northwest compared to the southeast. The desertified area showed a decreasing trend, in which the non-desertified and severe desertified area changed greatly. The surface soil of desert grassland was dominated by fine sand, which accounted for 24.78% to 41.08% in the surface soil under different degrees of desertification. The particle sizes of wind-erodible soil were 0.08－0.1 and 0.7－1 mm respectively. The average particle sizes of soil particles under non-desertified, mild, moderate, severe and extremely severe desertification were 0.18, 0.24, 0.28, 0.42, and 0.97 mm, and the mean fractal dimensions were 2.82, 2.73, 2.74, 2.70 and 2.52, respectively. A significant negative correlation existed between fractal dimension and desertification index (R^2=0.748), indicating that the smaller the fractal dimension, the worse the surface desertification. 【Conclusion】 Parameters including soil particle size and fractal dimension all showed that the desertification degree of desert grassland at the northern foot of Yinshan Mountains has been alleviated, but the wind erosion particles of surface soil tend to be coarse-grained.

Key words: desertification; soil grain size; fractal dimension; desert steppe; the northern foot of Yinshan

荒漠化指包括气候变异和人类活动在内的各种因素造成的干旱、半干旱和亚湿润干旱地区的土地退化过程[1]，是目前人类所面临的重大环境与社会问题之一，它不仅威胁着生态系统的稳定性，还直接影响人类的生产生活和社会经济发展。作为荒漠化的主要类型，土地沙漠化具体表现为沙质荒漠化或风蚀荒漠化，是我国北方草原退化和土地沙化的主要表现形式之一，沙漠化不仅减少了可利用土地资源，还导致农牧业减产及生态环境稳定性失衡[2]，对当地生态与社会经济的可持续发展造成了影响。我国北方中东部区域的自然景观以荒漠草原、干草原和疏林草原为主，其中荒漠草原是草原向荒漠过渡的脆弱生态系统，是沙漠化扩张和逆转的关键区域[3]，在气候变化和人类活动的双重影响下，生态系统退化严重，风蚀沙化问题日益加剧。

粒度作为土壤物理性质的重要参数指标，能反映不同粒径土壤颗粒的含量及其分布形式，是揭示土壤风蚀发生过程及发展机制的关键因素[4]，直接影响着土壤沙漠化的发生及演变，在土地沙漠化研究中具有广泛的应用价值[5]。此外，分形维数作为粒度分析中的一种重要指标，能定量描述土壤结构特征，在土地沙化研究中广泛涉及[6]，其不仅可以表征土壤物质的局部形态结构、物理化学信息与功能[7]，还可结合粒度参数共同表征土壤质地变化及风蚀搬运过程[8]。

阴山北麓位于我国北方干旱与半干旱地带，地处内蒙古高原南缘，是中国北方农牧交错带的重要组成部分，该区域分布着大面积的固定和活化沙地，是我国生态环境较为严酷、生态系统较为脆弱的敏感带[9]。草地退化、土地沙化及水土流失是该区域目前面临的主要生态环境问题，长期以来受到广泛关注。已有研究者围绕该区域的土壤风蚀[10-12]、作物水分利用[13-14]、土壤碳特征[15-16]等进行了大量研究，然而关于该区域沙漠化过程中地表土壤粒度变化等的研究较为缺乏。鉴于此，本试验以内蒙古阴山北麓为研究区，探究该区域2000－2024年的沙漠化特征及时空演变规律，并进一步分析不同沙漠化程度地表土壤颗粒粒度特征及分形特征，揭示沙漠化对土壤粒度的影响，旨在为阴山北麓荒漠草原区土地沙漠化防治和生态恢复实践提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阴山北麓位于内蒙古中西部地区，为东西延伸的狭长地带，地理坐标为东经 107°17′－117°30′，北纬 40°13′－42°28′，东西长约800 km，南北宽50～160 km，总面积为 9.6×10^4 km^2。区域北部为内蒙古高原，东部为大兴安岭、南接阴山山脉，西临贺兰山山脉，地势由北至南逐渐升高。该区地域辽阔且地形复杂，地貌类型以低山丘陵和波状高原为主[17]，平均海拔为1 600 m[18]。行政区划上自西向东主要包括乌拉特中旗、达尔罕茂明安联合旗、太仆寺旗、四子王旗、商都县等11个旗县，89个

乡镇[19]。

研究区地处中温带，气候较为干旱，降水稀少，年平均气温－2.3～10.4 ℃，年平均降水量为100～350 mm。该区土壤类型为棕钙土和沙质栗钙土，植被分布较为密集，以克氏针茅（*Stipa krylovii*）、羊草（*Leymus chinensis*）和冷蒿（*Aritimisia frigida*）等草本植物为主。

1.2　土样采集与测定

于2000－2024年在研究区选取组分均匀的地表土壤，将长×宽×深＝10 cm×10 cm×3 cm表层物质混合均匀后采集装入自封袋并标记，共采集土壤样品290个，样点分布见图1。将采集的土壤样品充分混合均匀并烘干，称取200 g样品研磨后利用振筛机进行筛分试验，采用美国制粒度分级方法，将土壤颗粒粒径分为微沙（≤0.063 mm）、极细沙（0.063～≤0.125 mm）、细沙（0.125～≤0.315）、中沙（0.315～≤0.63 mm）、粗沙（0.63～≤1.25 mm）、极粗沙（1.25～2 mm）、砾石（≥2 mm）7个级别，用电子天平测定每个粒径土壤颗粒的质量，并计算其含量。以上7个级别土壤粒径可以划分为3类土壤组分，即＜0.063 mm的悬移组分、0.063～0.315 mm的跃移组分和＞0.315 mm的蠕移及风蚀残余组分。根据累积曲线以及Folk和Ward公式，计算土壤颗粒的粒度参数（平均粒径（M_Z）、分选系数（σ）、偏度（S_K）和峰度（K_G）），具体计算方法见文献[20]。

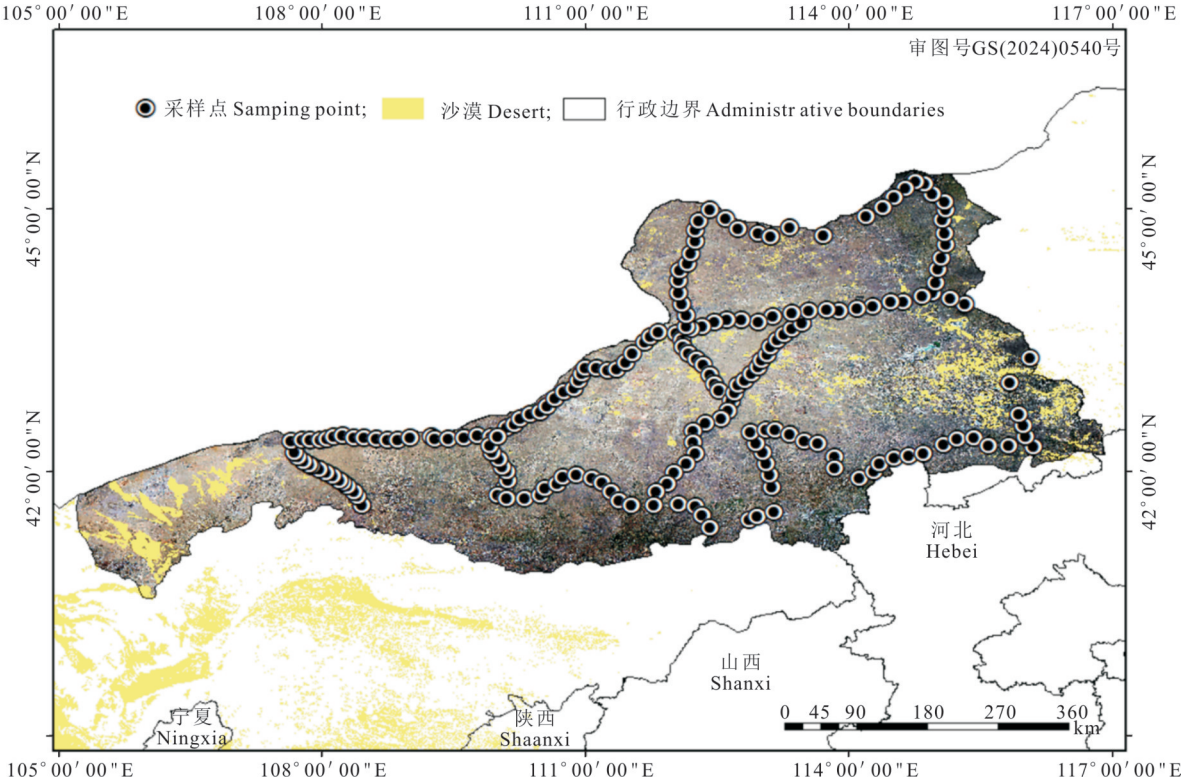


图1　采样点的位置

Fig. 1　Location of sampling point

1.3　数据处理与分析

1.3.1　沙漠化指数计算　本研究使用的Landsat遥感影像数据为美国国家航空航天局提供的MOD13A1数据（https://search. earthdata. nasa. gov），时间分辨率为16 d，空间分辨率为250 m，该产品已进行去云、辐射校正、大气校正等预处理。采用像元二分模型计算地表植被覆盖度[21]，计算公式为：

$$FVC=\frac{NDVI-NDVI_{soil}}{NDVI_{veg}-NDVI_{soil}}。\tag{1}$$

式中：FVC为植被覆盖度；NDVI代表混合像元NDVI值；$NDVI_{soil}$和$NDVI_{veg}$分别为裸土像元和纯植被像元的NDVI值，本研究选取累积频率为1%和99%的NDVI值为$NDVI_{soil}$和$NDVI_{veg}$值[22]。

沙漠化指数（DI）值的计算公式为[23]：

$$DI=1-FVC。\tag{2}$$

基于阴山北麓植被覆盖度计算结果，并依据全国荒漠化与沙化监测技术规定及前人研究经验[23-24]，将阴山北麓荒漠草原地表沙漠化程度分为5个等级：DI＜0.4时为未沙漠化，0.4≤DI＜0.6时为

轻度沙漠化,0.6≤DI<0.75时为中度沙漠化,0.75≤DI≤0.9时为重度沙漠化,DI>0.9时为极重度沙漠化。

1.3.2 土壤颗粒粒度累积频率间平均距离 土壤颗粒粒度累积频率间平均距离(L)可以反映成土母质风蚀作用对粒度及分形特征的影响,与土壤颗粒粒度累积频率曲线相互印证[25],L的计算公式如下:

$$L=\sqrt{\sum\left(P-\bar{P}\right)^{2}\left(K-1\right)}。\tag{3}$$

式中:P为土壤颗粒粒度累积频率;$\bar{P}$为不同地表土壤颗粒粒度累积频率的平均值;K为自由度,K=4。

1.3.3 土壤颗粒分形维数 土壤颗粒分形维数采用分段式权重计算方法进行计算,具体公式如下[26]:

$$D_i=3-\lg\left[\frac{w\left(d<\bar{d}_i\right)}{w_0}\right]/\lg\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}},\tag{4}$$

$$D=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{{D_1}^2+{D_2}^2+\cdots+{D_n}^2}{\sum D_i}\right)。\tag{5}$$

式中:D_i为每个粒径土壤颗粒的分形维数;d为土壤颗粒粒径;$w(d<d_i)$为直径小于$\bar{d}_i$土壤颗粒的累积质量;w_0为全部粒级土壤颗粒质量之和;$\bar{d}_i$为相邻粒级d_i与d_{i+1}间土壤颗粒的平均粒径;$\bar{d}_{\max}$为最大粒径土壤颗粒的平均直径;D为土壤颗粒分形维数;n为粒级的总数。

2 结果与分析

2.1 阴山北麓荒漠草原区地表沙漠化特征

阴山北麓荒漠草原区地表沙漠化分级及其分布如表1所示。表1显示,根据DI值,阴山北麓荒漠草原地表沙漠化程度分为5级;该区域近20多年来,DI值表现为消长波动特征,随着时间的延长总体下降(图2),表明该区沙漠化程度总体降低。

表1 阴山北麓荒漠草原区地表沙漠化分级及其分布

Table 1 Classification and distribution of surface desertification in desert grassland at the north foot of Yinshan Mountains

指标 Index	未沙漠化 Non-desertified	轻度沙漠化 Mild desertification	中度沙漠化 Moderate desertification	重度沙漠化 Severe desertification	极重度沙漠化 Extremely severe desertification
沙漠化指数(DI) Desertification index	<0.4	≥0.4~0.6	≥0.6~0.75	≥0.75~0.9	>0.9
样品数 Number of samples	28	62	52	42	106

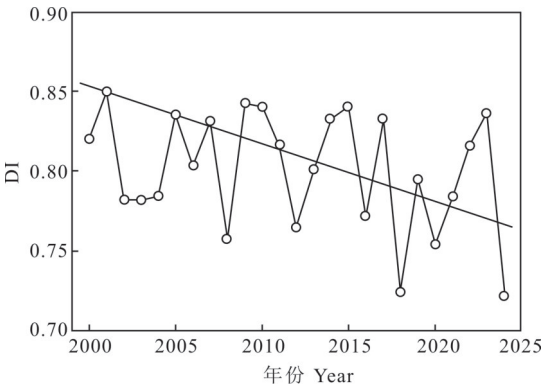


图2 2000—2024年阴山北麓荒漠草原区沙漠化指数(DI)的变化

Fig. 2 Changes in desertification index (DI) in desert grassland at the northern foot of Yinshan Mountains from 2000 to 2024

各级沙漠化面积的变化趋势见图3。从图3可以看出,阴山北麓未沙漠化面积在2000—2023年一直呈小幅波动趋势,到2024年未沙漠化面积呈显著增加趋势;轻度沙漠化面积表现为每隔2年出现1次增加或降低,循环波动,到2018年前后变化的幅度较大,2024年明显高于其他年份;中度沙漠化面积呈波动趋势,2020年达到最大;重度沙漠化面积表现为大幅的消长波动,2017—2018年明显下降,之后呈波动变化,2024年其面积达到最低;极重度沙漠化面积呈较均匀的小幅波动趋势,其中2008年面积最低。荒漠草原区沙漠化面积总体表现为缩减趋势。其中,极重度沙漠化面积由2000年的31 878.5 km^{2}大幅减少到2024年的17 092.75 km^2,降幅为46.38%;重度沙漠化面积由2000年的92 784.5 km^{2}大幅减少到2024年的28 725.75 km^2,降幅为69.04%;中度沙漠化面积由2000年的77 134 km^{2}增至2024年的77 175.25 km^2,增幅为0.05%;轻度沙漠化面积由2000年的24 812.75 km^{2}增至2024年的76 508.75 km^2,增幅为67.57%;未沙漠化面积由2000年的1724.5 km^{2}大幅增至2024年的28 917.75 km^2,增幅为94.04%。总体上,荒漠草原区沙漠化面积演变呈消长波动下降趋势,其中未沙漠化面积明显增加,重度沙漠化面积显著下降。

2000—2024年阴山北麓荒漠草原区沙漠化时空演变的特征如图4所示。

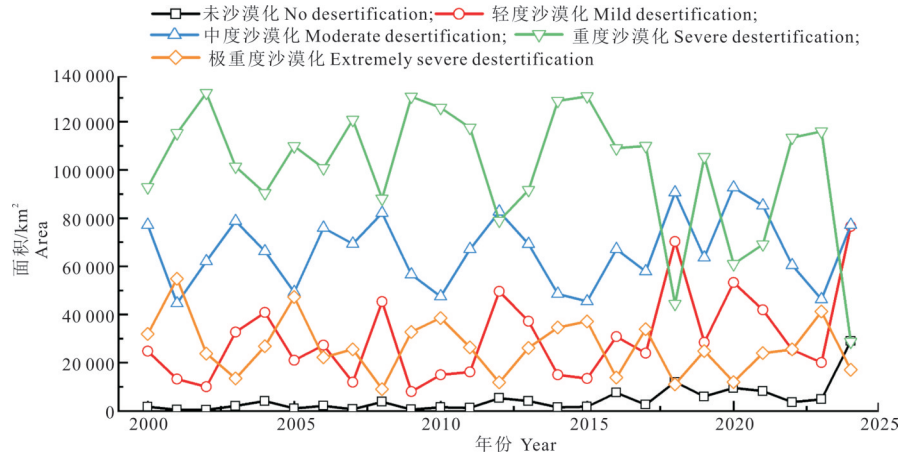


图 3　2000－2024 年阴山北麓荒漠草原区沙漠化面积变化趋势

Fig. 3　Variation trend of desertification area in desert grassland at the northern foot of Yinshan Mountains from 2000 to 2024

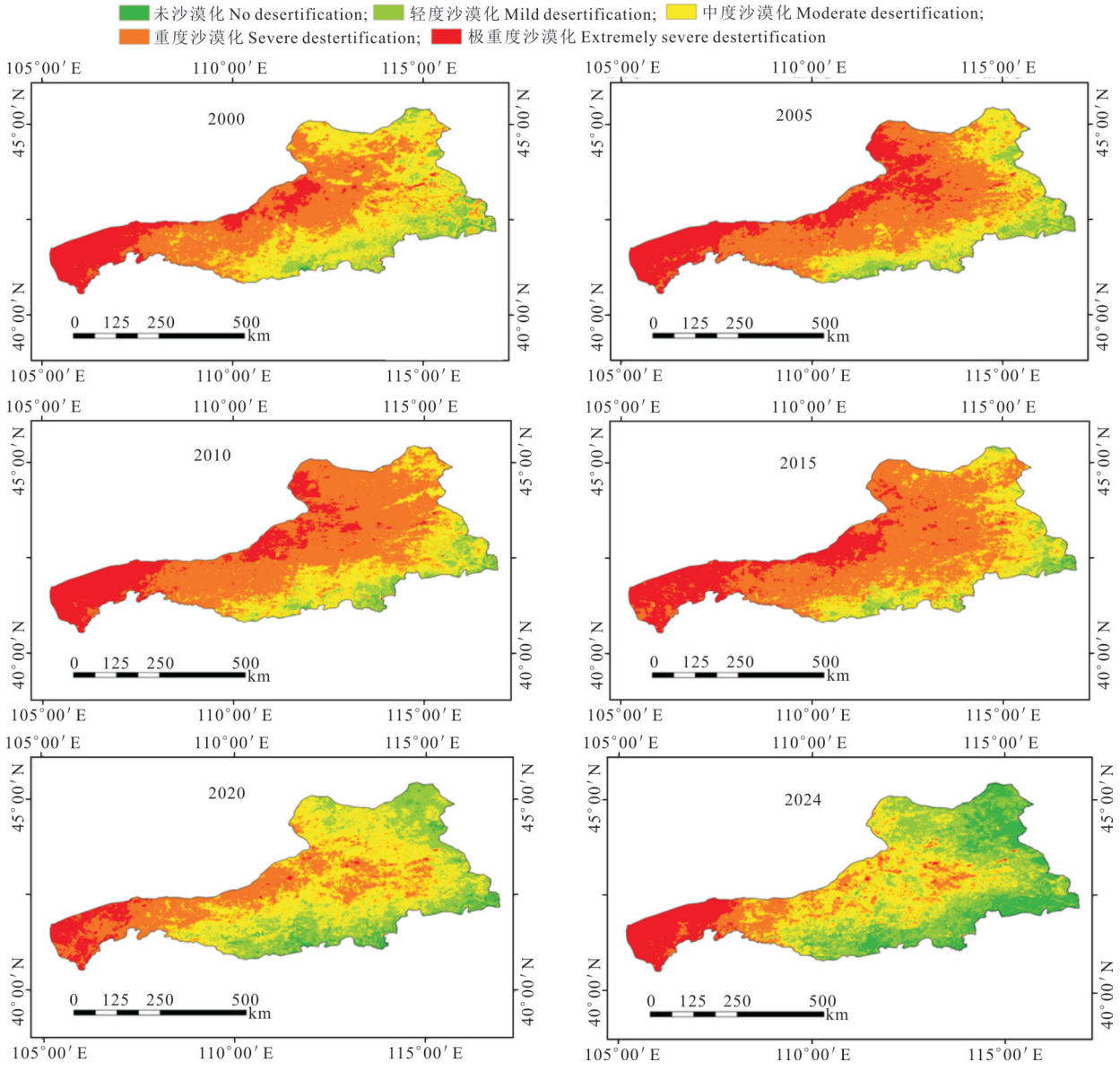


图 4　阴山北麓荒漠草原区沙漠化时空演变特征

Fig. 4　Spatiotemporal evolution characteristics of desertification in the desert grassland area at the northern foot of Yinshan Mountains

图 4 显示,从沙漠化的空间分布上来看,阴山北麓西北部地表的沙漠化程度显著高于东南部,西北部主要为极重度沙漠化和重度沙漠化区域,由西北向中部沙漠化程度逐渐减轻。东南部、东部和东北部的部分区域沙漠化程度最轻,为轻度沙漠化和未沙漠化区域。

2.2 阴山北麓荒漠草原区不同沙化地表土壤组分含量与分形特征

阴山北麓荒漠草原区地表土壤粒度组分与参数特征如图 5 和表 2 所示。

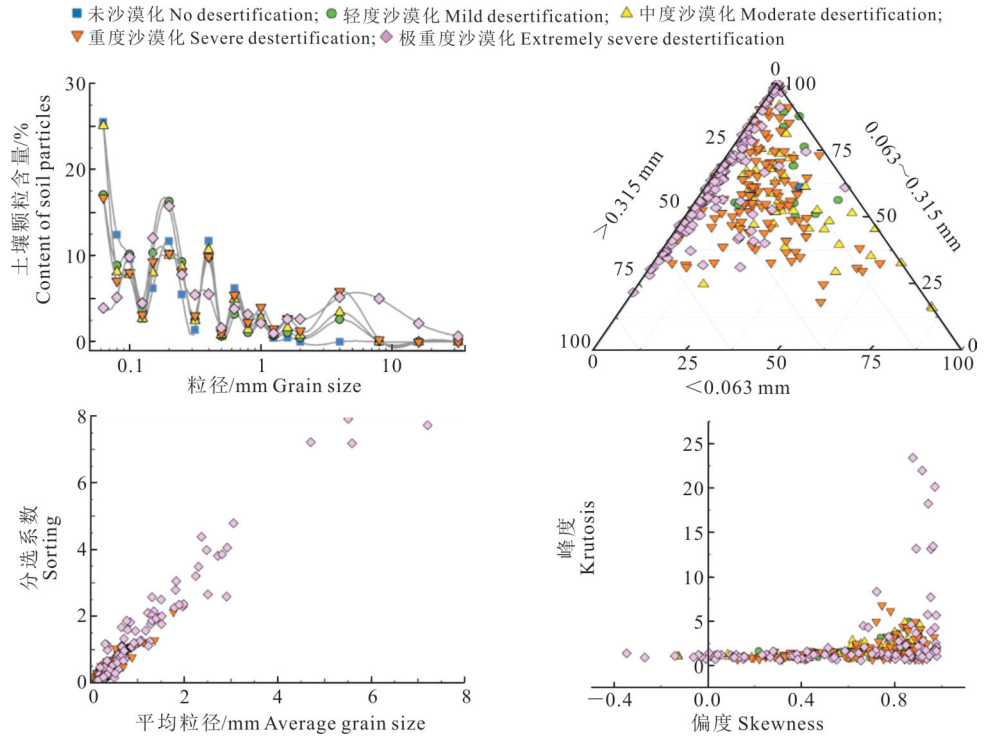


图 5 阴山北麓荒漠草原区地表土壤粒度特征的变化

Fig. 5 Change of surface soil particle size characteristics of the desert grassland at the northern foot of Yinshan Mountains

表 2 阴山北麓荒漠草原区地表土壤组分与参数

Table 2 Soil components and parameter of desert grassland at the northern foot of Yinshan Mountains

沙漠化程度 Degree of desertification	微沙/% Micro sand	极细沙/% Extremely fine sand	细沙/% Fine sand	中沙/% Medium sand	粗沙/% Coarse sand	极粗沙/% Very thick sand
未沙漠化 No desertification	25.50	24.69	24.78	19.16	5.38	0.49
轻度 Mild	17.05	22.70	38.52	13.64	3.98	1.52
中度 Moderate	25.07	18.57	29.23	16.40	4.96	2.36
重度 Severe	16.73	18.24	30.71	16.32	7.85	4.02
极重度 Extremely severe	3.93	19.47	41.08	10.97	6.33	5.26

沙漠化程度 Degree of desertification	砾石/% Gravel	平均粒径(M_Z)/mm Average grain size	分选系数(σ) Sorting	偏度(S_K) Skewness	峰度(K_G) Krutosis	分形维数(D) Fractal dimension
未沙漠化 No desertification	0.00	0.18	0.18	0.65	1.06	2.82
轻度 Mild	2.59	0.24	0.26	0.55	1.83	2.73
中度 Moderate	3.40	0.28	0.32	0.60	1.84	2.74
重度 Severe	6.12	0.42	0.49	0.67	1.82	2.70
极重度 Extremely severe	12.97	0.97	1.28	0.60	2.57	2.52

由图 5 和表 2 可以看出,该地区土壤组分均以细沙为主,不同沙漠化地表土壤组分差异较为明显。未沙漠化地表土壤平均粒径最小(0.18 mm),其中微沙、极细沙和细沙组分含量较高,分别为 25.50%,24.69% 和 24.78%,组分偏细;极重度沙漠化地表土壤平均粒径最大(0.97 mm),其中极粗沙和砾石等粗颗粒含量较其他沙漠化地表土壤相对偏高,分别为 5.26% 和 12.97%,可以看出随着沙

漠化程度的加剧，土壤颗粒粒径逐渐粗化。由粒度参数特征可以看出，土壤颗粒平均粒径和分选系数分布相对分散，平均粒径主要集中于0～1.5 mm，土壤组分偏细；分选系数主要集中在0～1.0，分选性较好偏中等；偏度趋向极正偏；从峰度看，峰态趋向尖窄。

由表2和图6可以看出，不同粒径土壤颗粒含量对分形维数值影响较大，分形维数值为1.90～2.99，主要集中在2.2～2.7，未沙漠化以及轻度、中度、重度和极重度沙漠化程度的土壤分形维数平均值分别为2.82，2.73，2.74，2.70和2.52。土壤分形维数与<0.063 mm土壤颗粒含量呈较显著的幂函数正相关关系，而与0.063～0.315 mm土壤颗粒和>0.315 mm土壤颗粒含量的相关性较差。可见地表土壤中的易风蚀颗粒含量越大，分形维数值越大。此外，沙漠化程度较重地表土壤中0.063～0.315和>0.315 mm土壤颗粒含量较高，土壤分形维数平均值较小；而未沙漠化与轻度沙漠化地区土壤<0.063 mm土壤颗粒含量较高，分形维数平均值较大。

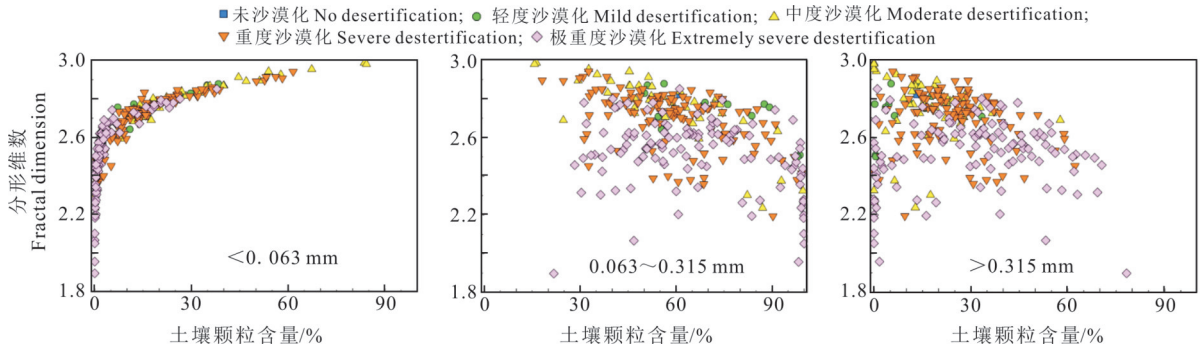


图6　阴山北麓荒漠草原区地表土壤颗粒组分与分形维数的关系

Fig. 6　Relationship between surface soil composition and fractal dimension in the desert grassland at the northern foot of Yinshan Mountains

阴山北麓荒漠草原地表土壤颗粒组分、分形维数与沙漠化指数的关系见图7。

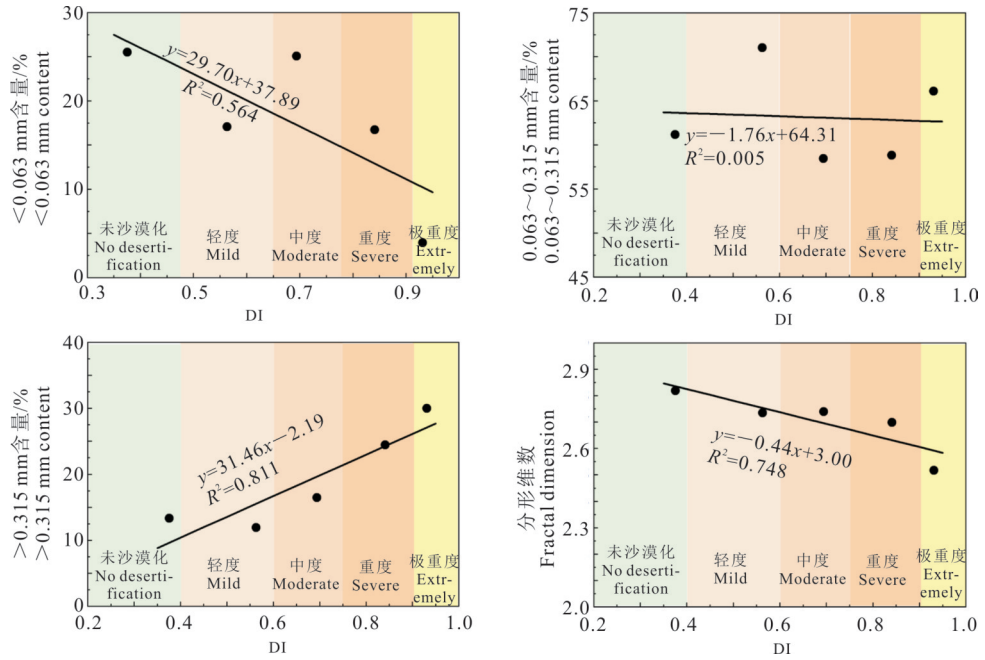


图7　阴山北麓荒漠草原区地表土壤颗粒组分、分形维数与沙漠化指数（DI）的关系

Fig. 7　Relationships among surface soil particle composition, fractal dimension, and desertification index (DI) in the desert grassland of northern foot of Yinshan Mountains

由图7可以发现，沙漠化指数与土壤组分含量和分形维数关系密切。随着<0.063 mm土壤颗粒含量的逐渐减少，地表沙漠化指数逐渐增加，二者呈较显著的负相关关系（R^2=0.564）；0.063～0.315 mm土壤颗粒含量与沙漠化指数关系不大（R^2=0.005）；随着>0.315 mm土壤颗粒含量的增

大,地表逐渐粗粒化,沙漠化指数也逐渐增加,二者呈显著的正相关关系(R^2=0.811);分形维数与沙漠化指数呈显著的负相关关系(R^2=0.748),可知土壤颗粒分形维数越小,地表沙漠化程度越严重。

2.3 阴山北麓荒漠草原区不同沙化地表土壤风蚀过程分析

图 8 显示,荒漠草原不同沙漠化程度地表土壤颗粒粒度累积频率分布曲线表现一致,可以看出该地区土壤母质差异性较小。当土壤颗粒粒径为 0.08~0.1 mm 时,不同沙漠化程度荒漠草原的 L 值增幅最大;其次为粒径 0.7~1 mm 土壤颗粒,可知研究区荒漠草原地表易风蚀土壤颗粒粒径主要为 0.08~0.1 和 0.7~1 mm,表明该粒径范围内的土壤颗粒较易发生跃移,还有少部分颗粒易发生表层蠕移。

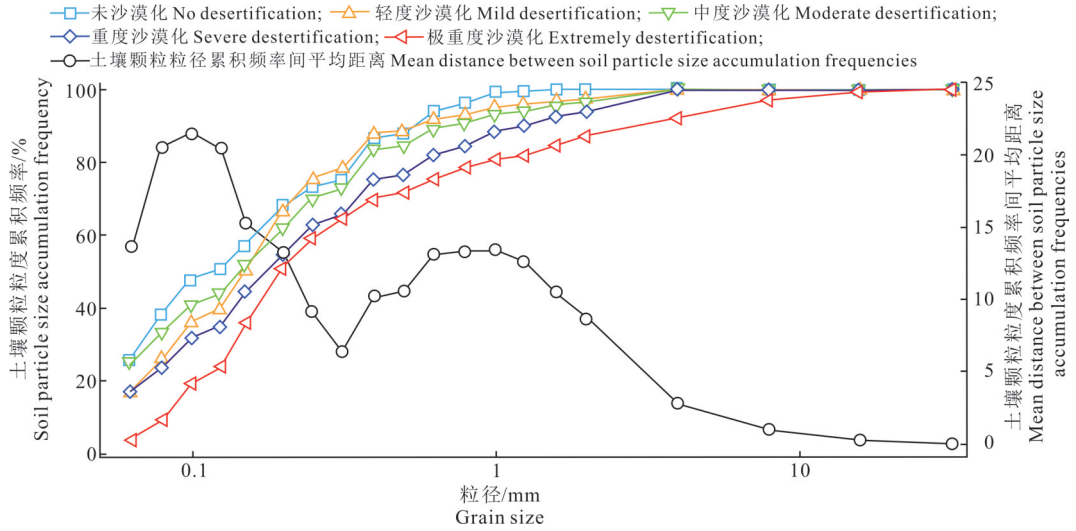


图 8 阴山北麓荒漠草原区地表土壤颗粒粒度累积频率(P)及土壤颗粒粒度累积频率间平均距离(L)的变化

Fig. 8 Changes in cumulative grain size frequency (P) of soil particles and mean distance (L) of cumulative grain size frequencies in the desert grassland of the northern foot of Yinshan Mountains

3 讨 论

本研究发现,阴山北麓荒漠草原地表沙漠化过程中的土壤粒度出现了粗化现象(极重度沙化区砾石含量达 12.97%),与刘大有等[27]提出的风蚀选择性搬运理论一致:即土壤细颗粒组分(<0.063 mm)优先被吹蚀,地表物质以蠕移及风蚀残余颗粒为主。然而,本研究发现,易风蚀土壤颗粒粒径(0.08~0.1 与 0.7~1 mm)与前人结论存在差异。例如,CHEPIL[4]研究认为细沙(0.1~0.25 mm)颗粒易被吹蚀,而本研究在粗沙段(0.7~1 mm)同样检测到较高的风蚀活性,这可能是由于研究区域环境条件存在差异所致。阴山北麓年均风速>6 m/s 风沙较为频繁,强风条件可能激发粗颗粒跃移[28];同时人类活动(如过度放牧和草原旅游)破坏了土壤结皮,释放深层土壤粗颗粒,加剧了土壤颗粒粗粒化进程。此外,土壤颗粒分形维数与沙漠化指数呈显著负相关(R^2=0.748),进一步验证了前人的论断[25],即分形维数可作为间接反映地表土壤风蚀潜力的有效指标。

本研究发现,2000—2024 年阴山北麓沙漠化面积缩减(极重度沙漠化面积减少 46.38%),但土壤粒度参数表明该地区风蚀颗粒粗粒化现象较为明显。此外,本研究区地表土壤 DI 值逐年降低,植被得到了有效恢复,但极重度沙漠化区土壤中极粗沙组分含量仍达 5.26%,且分形维数(2.52)显著低于未沙化土壤(2.82),表明植被恢复虽可有效改善地表稳定性,但对改善土壤质地还未有明显效果。这是由于阴山北麓地区西北部降水量低,蒸发量高[29],使得地表抗风蚀能力减弱,加之区域旅游业发展破坏了地表植被与结皮,加速了粗颗粒暴露[29],使得该地区沙漠化程度依然较为严重,土壤粗化现象明显。

本研究定量分析了阴山北麓区域地表土壤沙漠化时空动态及土壤颗粒参数特征,但未能区分自然风蚀与人为干扰对其的影响,因此后续研究中应结合风洞试验与同位素示踪方法[30],量化风蚀、放牧、旅游等对土壤粗粒化的贡献并检验其普适性。

4　结　论

1）2000—2024 年，阴山北麓区域地表沙漠化指数总体呈下降趋势，研究区极重度沙漠化和重度沙漠化主要发生在西北部，由西北向中部沙漠化程度逐渐减轻。东南部、东部和东北部的部分区域沙漠化程度最轻，为轻度沙漠化和未沙漠化区域。

2）随着沙漠化程度的加剧，阴山北麓地表土壤颗粒粒径逐渐增大，分形维数与沙漠化指数呈显著的负相关关系。其中，未沙漠化地表土壤平均粒径最小（0.18 mm），土壤颗粒偏细，分形维数平均值为 2.82；极重度沙漠化地表土壤平均粒径最大（0.97 mm），土壤颗粒偏粗，分形维数均值为 2.52。

[参考文献]

[1] 赵哈林. 沙漠生态学[M]. 北京：科学出版社，2012.
ZHAO H L. Desert ecology[M]. Beijing：Science Press，2012.

[2] 董光荣. 中国沙漠形成演化气候变化与沙漠化研究[M]. 北京：海洋出版社，2002.
DONG G R. Study on formation and evolution of desert，climate change and desertification in China[M]. Beijing：Ocean Press，2002.

[3] 卢建男，李玉强，赵学勇，等. 半干旱区典型沙地生态环境演变特征及沙漠化防治建议[J]. 中国沙漠，2024，44(4)：284-292.
LU J N，LI Y Q，ZHAO X Y，et al. Characteristics of ecological environment changes and advices for combating desertification in typical semi-arid sandy land[J]. Journal of Desert Research，2024，44(4)：284-292.

[4] CHEPIL W S. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind[J]. Soil Science，1953，76(5)：389-400.

[5] LIU M F，WANG D，TIAN X P，et al. Multifractal parameters reveal the impacts of shrub encroachment on soil particle size distribution（PSD）in a coastal wetland of the Yellow River Delta[J]. Journal of Coastal Conservation，2024，28(4)：63.

[6] 宋孝玉，李亚娟，李怀有，等. 不同地貌类型及土地利用方式下土壤粒径的分形特征[J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2009，37(9)：155-160，167.
SONG X Y，LI Y J，LI H Y，et al. Fractal characteristics of soil particle-size distributions under different landform and land-use types[J]. Journal of Northwest A&F University（Natural Science Edition），2009，37(9)：155-160，167.

[7] SAN JOSÉ MARTÍNEZ F，MARTÍN M A，CANIEGO F J，et al. Multifractal analysis of discretized X-ray CT images for the characterization of soil macropore structures[J]. Geoderma，2010，156(1/2)：32-42.

[8] XU G C，LI Z B，LI P. Fractal features of soil particle-size distribution and total soil nitrogen distribution in a typical watershed in the source area of the middle Dan River，China[J]. Catena，2013，101：17-23.

[9] 林长存，王堃，孙钰茗. 中国北方农牧交错带中段近 60 年气温序列变化研究[J]. 草地学报，2016，24(4)：747-753.
LIN C C，WANG K，SUN Y M. Study on the change of temperature time series in medium section of agro-pastoral ecotone of northern China during the last 60 years[J]. Acta Agrestia Sinica，2016，24(4)：747-753.

[10] 孙悦超，陈智，赵永来，等. 阴山北麓农牧交错区草地土壤风蚀测试[J]. 农业机械学报，2013，44(6)：143-147.
SUN Y C，CHEN Z，ZHAO Y L，et al. Test of grassland soil erosion of farming-pastoral zone in northern foot of Yinshan Mountains[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(6)：143-147.

[11] WU X G，FAN J Q，SUN L，et al. Wind erosion and its ecological effects on soil in the northern piedmont of the Yinshan Mountains[J]. Ecological Indicators，2021，128：107825.

[12] 高婕，李倩，刘景辉，等. 留茬高度对带状留茬间作农田土壤防风蚀效果的影响[J]. 水土保持通报，2013，33(3)：29-32.
GAO J，LI Q，LIU J H，et al. Effects of stubble height on wind erosion prevention in strip intercropping farmland with stubble[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2013，33(3)：29-32.

[13] YANG Y，LIU H，TAO W H，et al. Spatiotemporal variation characteristics and driving force analysis of precipitation use efficiency at the north foot of Yinshan Mountain[J]. Water，2024，16(1)：99.

[14] 张婷婷，段玉，张君，等. 阴山北麓向日葵需水规律及水氮耦合效应研究[J]. 灌溉排水学报，2023，42(10)：23-31.
ZHANG T T，DUAN Y，ZHANG J，et al. Study on water demand and coupling effect of water and nitrogen on sunflower in the north of Yinshan Mountain[J]. Journal of Irrigation and Drainage，2023，42(10)：23-31.

[15] 王赟博，孙宇，赵清格，等. 阴山北麓农牧交错区退耕地草地生态系统碳交换及水分利用效率[J]. 生态学报，2022，42(12)：4922-4932.
WANG Y B，SUN Y，ZHAO Q G，et al. Effects of natural restoration on the ecosystem carbon exchange and water use efficiency in the abandoned cropland in the Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica，2022，42(12)：4922-4932.

[16] 吕舒宁，郭占斌，刘瑞香，等. 藜麦种植对内蒙古阴山北麓不同质地土壤团聚体稳定性及碳氮分布的影响[J]. 农业环境科学学报，2025，44(1)：85-94.
LÜ S N，GUO Z B，LIU R X，et al. Effects of quinoa cultivation on soil aggregate stability and carbon and nitrogen distribution in different textures at the northern foot of Yinshan Mountain in Inner Mongolia[J]. Journal of Agro-Environment Science，2025，44(1)：85-94.

[17] 吴晓光. 内蒙古阴山北麓生态退耕对土壤风蚀的影响及效应研[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2019.
WU X G. 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，2019.

[18] 张立汉. 中国山河全书[M]. 山东青岛：青岛出版社，2005.

ZHANG L H. A complete book of mountains and rivers in China[M]. Qingdao, Shandong: Qingdao Publishing House, 2005.

[19] 赵一美. 阴山北麓生态环境质量演变与草畜平衡分析[D]. 西安:西安理工大学,2024.
ZHAO Y M. Ecological environment quality evolution and grass-livestock balance analysis on the Yinshan Mountain Range[D]. Xi'an University of Technology,2024.

[20] FOLK R L, WARD W C. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology,1957,27(1):3-26.

[21] 武爽,冯险峰,孔玲玲,等. 气候变化及人为干扰对西藏地区草地退化的影响研究[J]. 地理研究,2021,40(5):1265-1279.
WU S,FENG X F,KONG L L,et al. Effects of climate variation and human activities on grassland degradation in Tibet[J]. Geographical Research,2021,40(5):1265-1279.

[22] 沈贝贝,魏一博,马磊超,等. 内蒙古草原植被覆盖度时空格局变化及驱动因素分析[J]. 农业工程学报,2022,38(12):118-126.
SHEN B B,WEI Y B,MA L C,et al. Spatiotemporal changes and drivers of fractional vegetation cover in Inner Mongolia grassland of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2022,38(12):118-126.

[23] 张迎杰,樊雪丰,刘建成,等. 赤峰市土地荒漠化时空变化分析[J]. 环境保护科学,2025,51(2):152-158,174.
ZHANG Y J,FAN X F,LIU J C,et al. Analysis of spatial-temporal variation characteristics of land desertification in Chifeng[J]. Environmental Protection Science,2025,51(2):152-158,174.

[24] REN J L,ZHAO W Z,HE Z B,et al. Spatiotemporal variations of tenebrionid beetles (Coleoptera: Tenebrionidae) in the Gobi Desert,northwest China[J]. Journal of Arid Land,2025,17(1):112-129.

[25] 闫玉春,唐海萍,张新时,等. 基于土壤粒度分析的草原风蚀特征探讨[J]. 中国沙漠,2010,30(6):1263-1268.
YAN Y C,TANG H P,ZHANG X S,et al. A probe into grassland wind erosion based on the analysis of soil particle size[J]. Journal of Desert Research,2010,30(6):1263-1268.

[26] LIU X Y,WANG H B,ZUO H J,et al. Fractal of the Gobi surface sediment components and its variability characteristics[J]. Catena,2022,218:106525.

[27] 刘大有,董飞,贺大良. 风沙二相流运动特点的分析[J]. 地理学报,1996,51(5):434-444.
LIU D Y,DONG F,HE D L. An analysis of the characters of blown sands[J]. Acta Geographica Sinica,1996,51(5):434-444.

[28] 苗恒录,王健,张瑞强,等. 内蒙古阴山北麓荒漠草原风况与输沙势研究:以希拉穆仁草原为例[J]. 干旱区资源与环境,2022,36(4):102-110.
MIAO H L,WANG J,ZHANG R Q,et al. Study on wind conditions and sediment transport potential of desert grassland in the northern slope of Yinshan Mountain in Inner Mongolia: taking Xilamuren grassland as an example[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2022,36(4):102-110.

[29] 王雪超,刘艳萍,高永,等. 旅游扰动对草原植被及土壤的影响[J]. 草原与草坪,2021,41(6):127-131,138.
WANG X C,LIU Y P,GAO Y,et al. Effects of tourism disturbance on vegetation and soil properties of grassland[J]. Grassland and Turf,2021,41(6):127-131,138.

[30] YU A,YANG Q,XU B,et al. Analysis of lead contamination sources in roadside soil via the isotope tracing method[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering,2024,12(6):114205-114205.

(责任编辑:李小平)

(上接第118页)

[26] SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ R,TORRES-MENA J E,QUINTANAR-JURADO V,et al. Ptgr1 expression is regulated by NRF2 in rat hepatocarcinogenesis and promotes cell proliferation and resistance to oxidative stress[J]. Free Radical Biology and Medicine,2017,102:87-99.

[27] JU X,WANG Z J,CAI D F,et al. DNA methylation in poultry: a review[J]. Journal of Animal Science and Biotechnology,2023,14(1):138.

[28] 吕超. LRP1与汶上芦花鸡肉质性状的相关性分析及功能验证[D]. 长春:吉林大学,2019.
LÜ C. Correlation analysis between LRP1 and meat quality and its functional verification in Wenshang barred chicken[D]. Changchun:Jilin University,2019.

[29] LEREA C L,SOMERS D E,HURLEY J B,et al. Identification of specific transducin alpha subunits in retinal rod and cone photoreceptors[J]. Science,1986,234(4772):77-80.

[30] MIZUSHIMA N,KOMATSU M. Autophagy: renovation of cells and tissues[J]. Cell,2011,147(4):728-741.

(责任编辑:马秋明)