

呼伦贝尔草原风蚀坑土壤质地与持水能力特征

张额真¹, 袁立敏^{2,3,4}, 蒙仲举¹, 赵阳², 包志鑫¹

(1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区林业科学研究院林草科创中心, 呼和浩特 010010; 3. 内蒙古自治区沙地(沙漠)生态系统与生态工程重点实验室, 呼和浩特 010010; 4. 沙地生物资源保护与培育国家林业和草原局重点实验室, 呼和浩特 010010)

摘要: [目的] 为揭示呼伦贝尔草原风蚀坑 4 个典型部位的土壤质地差异和持水能力变化特征。[方法] 将风蚀坑分为边缘区(A 区)、沙坑区(B 区)、重度积沙区(C 区)、轻度覆沙区(D 区)4 个部位, 以天然草地为对照(CK 区), 对各样地 0~200 cm 土层土壤粒径、土壤体积质量、田间持水量等指标进行相关性分析和 PCA 分析。[结果] 1) 呼伦贝尔草原风蚀坑 0~200 cm 土层土壤以中砂为主, 不含砾石, 平均粒径大小为 B 区(1.41 Φ)>A 区(1.48 Φ)>C 区(1.52 Φ)>D 区(1.98 Φ)>CK 区(2.45 Φ)。2) 风蚀坑 4 个部位土壤粒度参数存在显著性差异, 分选系数总体分选性较差, 峰态数值表现为尖窄, 偏度都呈极正偏, 分形维数总体为 2.1~2.2。3) 平均粒径沿主导风(西北风)逐渐变细, C 区和 D 区的分选作用较强, 而 A、B 的分选作用较弱。4) 风蚀坑土壤体积质量为 1.55~1.70 g/cm³, 土壤水分体积分数为 CK 区(4.51%)>A 区(4.4%)>D 区(4.35%)>B 区(4.23%)>C 区(4.2%), 田间持水量为 CK 区(17.97%)>D 区(16.95%)>A 区(15.53%)>B 区(15.26%)>C 区(14.51%)。5) 风蚀坑不同部位的土壤水分体积分数与土壤机械组成中的黏粒、粉粒、细砂、极细砂呈正相关, 与土壤机械组成中的中砂、粗砂、极粗砂呈负相关。[结论] 风蚀坑总体平均粒度呈沿主导风向变细, C 区持水能力最弱, D 区持水能力最强, 为风蚀坑的分部位治理提供理论依据。

关键词: 风蚀坑; 土壤粒径; 田间持水量; 风蚀; 呼伦贝尔沙地

中图分类号: S812.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0225-10

Characteristics of Soil Texture and Water-Holding Capacity of Blowout Pits in the Hulunbuir Grassland

ZHANG Ezhen¹, YUAN Limin^{2,3,4}, MENG Zhongju¹, ZHAO Yang², BAO Zhixin¹

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Science and Technology Innovation Center of Forestry and Grassland, Inner Mongolia Academy of Forestry, Hohhot 010010, China;

3. Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Sandy (Desert) Ecosystem and Ecological Engineering, Hohhot 010010, China; 4. Key Laboratory of Conservation and Cultivation of Biological Resources in Sandy Land,

National Forestry and Grassland Administration, Hohhot 010010, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to reveal the soil texture difference and water-holding capacity change characteristics of four typical parts of blowout pits in the Hulunbuir grassland. [Methods] The blowout pits were divided into four parts: the edge area (A area), the sand pit area (B area), the severe sand accumulation area (C area), and the mild sand coverage area (D area). The natural grassland was used as the control (CK area). Correlation analysis and PCA analysis of soil properties including soil particle size, bulk density, water-holding capacity, etc. in the 0—200 cm soil layer of each pit were carried out. [Results] 1) The soil in the 0—200 cm soil layer of blowout pits in the Hulunbuir grassland was mainly medium sand, there was no gravel, and the average particle size was B area (1.41 Φ)>A area (1.48 Φ)>C area (1.52 Φ)>D area (1.98 Φ)>CK area (2.45 Φ). 2) There were significant differences in soil particle

收稿日期: 2025-02-21

修回日期: 2025-04-14

录用日期: 2025-04-29

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-05-29

资助项目: 内蒙古重点研发和成果转化计划项目(2022YFDZ0055)

第一作者: 张额真(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: nmgzhangezhen@163.com

通信作者: 袁立敏(1982—), 男, 博士, 研究员, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: nmgyuanlm@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

size parameters of the four parts of the blowout pits. The sorting coefficient was generally poor, the peak value was sharp and narrow, the skewness was extremely positive, and the fractal dimension was generally distributed around 2.1–2.2. 3) The average particle size gradually decreased along the main wind (northwest wind). The sorting effects of C and D were stronger, while the sorting effects of A and B were weaker. 4) Soil bulk density of wind erosion pits was between 1.55–1.70 g/cm³, soil water content was CK area (4.51%)>A area (4.4%)>D area (4.35%)>B area>(4.23%)>C area (4.2%), and field water-holding capacity was CK area (17.97%)>D area (16.95%)>A area (15.53%)>B area (15.26%)>C area (14.51%). 5) Soil water content in different parts of blowout pits was positively correlated with clay, silt, fine sand, and very fine sand fractions, and negatively correlated with medium sand, coarse sand, and very coarse sand fractions. [Conclusion] The overall average particle size of blowout pits becomes finer along the main wind direction. Water-holding capacity is the weakest in the C area, and strongest in the D area. The findings provide a theoretical basis for the management of blowout pits.

Keywords: blowout pits; soil particle size; field capacity; wind erosion; Hulunbuir sandy land

Received: 2025-02-21

Revised: 2025-04-14

Accepted: 2025-04-29

Online(www.cnki.net): 2025-05-29

干旱或半干旱草原生态系统具有高度的敏感性和脆弱性^[1],在气候变迁等自然条件及放牧过度或车轮碾压等人为活动的双重影响下,受风蚀作用形成“风蚀坑”^[2],风蚀坑标志着草原上流动沙丘形成的初期阶段,随着邻近风蚀坑的扩展和相互融合,沙物质的积累区域趋向于集中并连绵成片,形成沙带^[3]。风蚀坑的出现和发展破坏草原的原有土壤结构,使得底层的沙物质覆盖原有的草场^[4]。风蚀坑的发展初期主要表现为对地表物质的侵蚀,此现象在风蚀坑形成的早期阶段尤为显著。风蚀坑的发育前期,风蚀坑的长度和宽度的发展主要是通过该种侵蚀过程实现的。随着风蚀坑的进一步发展,地形演变和植被覆盖度降低等因素对风沙流的影响日益显著,加剧风蚀坑的侵蚀作用,使得风蚀坑深度加深。风蚀坑的发育后期,由于风蚀和沙埋的复合影响,加之邻近风蚀坑的扩展与融合效应,共同推动草原景观向沙地景观的快速过渡^[5]。

草原风蚀坑的形成与发育严重影响草原生态系统^[6],在风蚀的作用下,地表土壤被剥蚀、搬运、堆积导致草原原有的土壤结构被改变,土壤质地粗化、保水能力不断下降,在风蚀和沙埋的长期影响下,草地不断退化^[7],植被类型向沙生植物逐渐退化^[8]。在植被退化和土壤质地粗化的同时,土壤水分体积分数、蒸发量、入渗速率也在不断地发生变化^[9]。近年来,利用粒度分析的方法对毛乌素沙地^[10]、浑善达克沙地^[11]、科尔沁沙地^[12]、呼伦贝尔沙地^[13]无防护措施的原生土壤沉积物进行研究,同时对沙地表面风沙流状况、沙尘来源、浅层土壤^[14]沉积结构进行充分的研究。目前,对草原风蚀坑的不同形态发育、空气动力^[15]、演变过程等方面研究较多,但缺乏深度土壤粒度特征及土壤持水能力研究。因此,本研究以呼伦贝尔草原典型风蚀坑不同部

位的土壤质地变化和土壤持水能力为研究对象,明晰风蚀坑不同部位土壤粒度变化特征及风蚀坑 0~200 cm 深层土壤持水能力变化特征,为草原可持续管理以及草原风蚀坑分部位治理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取内蒙古自治区呼伦贝尔市鄂温克族自治旗(47°32′~49°15′N, 118°48′~121°09′E)、陈巴尔虎旗(48°48′~50°12′N, 118°22′~121°02′E)3个典型草原风蚀坑为研究区(图1),该区属于中温带半干旱大陆性气候,冬季漫长寒冷,主害风为西北风和东南风,并且西北风集中为春冬两季,东南风集中为夏秋两季,夏季温和短促,降水较集中,春秋两季气候变化剧烈,昼夜温差大,降水少,多大风。年平均气温-2℃,多年平均降水量 332 mm,集中发生于 7—8 月,多年平均蒸发量 1 174 mm,无霜期 90~110 d。地带性土壤为黑钙土、栗钙土,非地带性土壤以风沙土、草甸土、沼泽土和盐碱土为主^[13]。

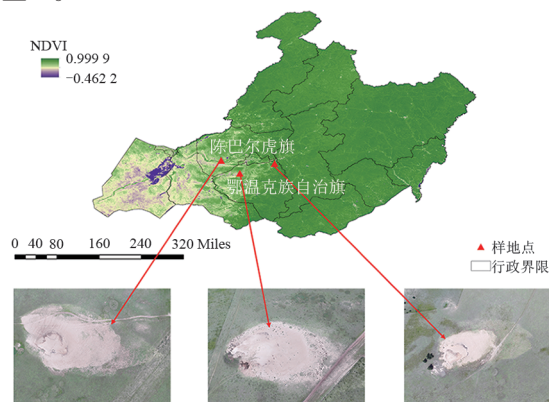


图1 研究区位置及植被盖度特征

Fig. 1 Location and vegetation coverage characteristics of the study area

在对研究区风蚀坑不同部位的土壤坡面进行取样时,对每个部位的覆沙厚度使用测量尺进行测量,以地表起伏程度和风沙堆积厚度对风蚀特征进行初步判断,在每个部位内随机布设 3 个 1 m×1 m 调查样方,每个样方相距 50 m,以目测法对植被覆盖度进行计算,汇总计算平均值见表 1。

表 1 风蚀坑基本情况

Table 1 Basic information of wind erosion pits				
典型部位	编号	覆沙厚度/cm	积蚀特征	植被盖度/%
边缘区	A	0	-	36
沙坑区	B	80~86	-	0
重度积沙区	C	44~54	+	2
轻度覆沙区	D	4~11	+	51
CK	CK	0	*	65

注: + 为积沙作用; - 为风蚀作用; * 为无积蚀特征

由图 2 可知,草原风蚀坑沙坑区的剖面主要分为风成沙、古土壤、下伏古土壤和下伏河湖湘沙^[16],风成沙在 0~80 cm 处分布,古土壤在 80~110 cm 处分布,下伏古土壤在 110~160 cm 处分布,下伏河湖湘沙在 160~200 cm 处分布,风沙土成土于风成土母质,风沙土与下伏原始土壤有明显差异。全文以 A 区为边缘区、B 区为沙坑区、C 区为重度积沙区、D 区为轻度覆沙区进行代替。

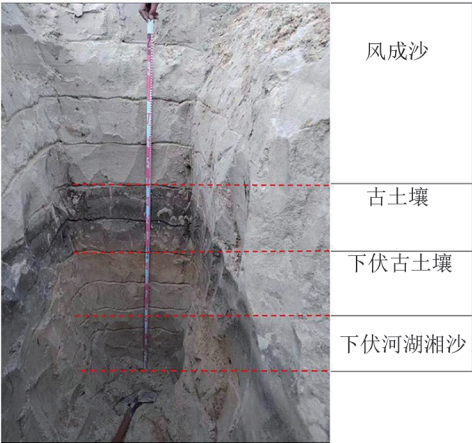


图 2 风蚀坑土壤剖面特征

Fig. 2 Characteristics of the soil profile of blowout pit

1.2 风蚀坑的划分

风蚀坑不同部位受到风蚀和积沙作用形成特殊地貌,因此,通过风向和积沙程度、形成原因和自身特点,将风蚀坑分为 4 个典型部位(图 3),从内向外将风蚀坑分为“边缘区、沙坑区、重度积沙区、轻度覆沙区”^[3],以天然草地(CK)为对照。“重度积沙区”是风蚀坑中积沙最为严重的部位,因为其积沙过度严重并且受到风力作用强烈,基本没有植物生长。“轻度覆沙区”积沙程度较小,有大量植物生长。“边缘区”风蚀和土壤流失较为严重,但有少量植物生长。“沙坑区”风蚀程度极度严重,形成明显凹面,没有植物生长。

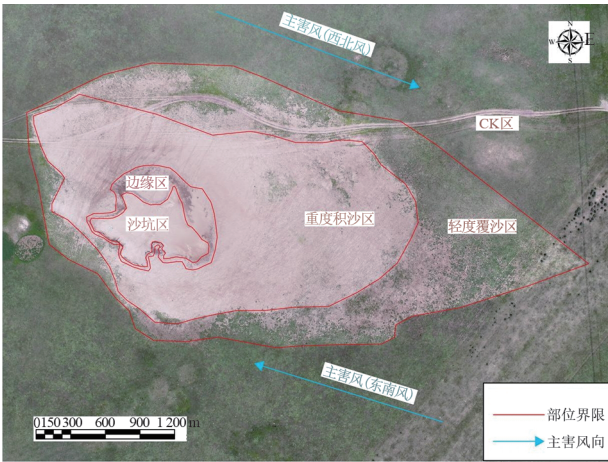


图 3 风蚀坑部位分布示意

Fig. 3 Distribution of different parts of blowout pit

1.3 研究方法

1.3.1 粒度测定 1)野外样品采集。于 2023 年 7 月 26 日,对所选取的风蚀坑不同部位上风口随机位置,纵向挖取土壤剖面,设置为宽度 2 m、长度 3 m、深度 2 m,土壤表层画出坑口基本轮廓,按阶梯状进行下挖,土壤剖面一面为垂直平面,一面为阶梯状,按深度选取 11 个梯度,分别为 0、20、40、60、80、100、120、140、160、180、200 cm,每个处理做 3 个重复,结束后将 3 组同一高度样品进行混合,减少试验误差。

2)室内实验。采集土样后带回实验室进行前期处理。鉴于 Mastersizer 3000 激光粒度仪的粒度范围,测定前使用 2 mm 筛子去除样品中的砾石,并将筛出的砾石称重记录,将剩余土壤进行风干,风干后的样品取 1.5 g 放置于 50 mL 的烧杯中,加入 10 mL 浓度为 0.1 mol/L 的过氧化氢溶液在加热板上加热,并用玻璃棒搅拌至溶液颜色变为黄绿色,去除样品中的有机质与过量的过氧化氢溶液后,加入适量 0.1 mol/L 的氯化氢溶液并用玻璃棒搅拌,除去样品中的碳酸盐,待溶液无气泡产生时停止加热,等待样品溶液冷却;将冷却后的溶液移入 500 mL 烧杯中加入蒸馏水稀释静置 12 h,静置结束后,利用皮软管将上层清液抽出,如此反复稀释 2~3 次至溶液呈中性,静置除去上清液,剩余的部分加入 10 mL 浓度为 0.1 mol/L 的六偏磷酸钠溶液作为分散剂,使样品充分分散后,使用 Mastersizer 3000 激光粒度仪测量样品粒径的体积分数,测量范围为 0.01~3 500 μm,遮光度为 5%~15%,每个样品重复测量 3 次取平均值^[17]。

3)计算方法。室内试验完成后采用仪器自带软件的用户分级功能划分土壤机械组成,以美国制土壤粒径分级标准^[18]输出黏粒(<2 μm)、粉粒(2~50 μm)、极细砂(50~100 μm)、细砂(100~250 μm)、中砂(250~500 μm)、粗砂(500~1 000 μm)、极粗砂(1 000~

2 000 μm)和砾石($>2\ 000\ \mu\text{m}$),并输出土壤颗粒累积体积分数为 5%、10%、16%、25%、50%、75%、84%、90%、95% 所对应的颗粒直径以备粒度参数的计算。使用 Udden-Wenworth 粒级标准^[19],根据 Kumdein 的算法进行对数转化,计算 Φ 值用来表示颗粒直径,并以此为基础运用 Folk、Ward 提出的粒度参数求解公式^[18],计算平均粒径(d_0)、分选系数(σ_0)及偏度(SK)和峰态(Kg),其中,分选系数(σ_0)、偏度(SK)、峰态(Kg)为无量纲统计参数,计算公式为:

$$\Phi = -\log_2 D \quad (1)$$

$$d_0 = \frac{1}{3}(\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}) \quad (2)$$

$$\Phi_0 = \frac{(\Phi_{84} - \Phi_{16})}{4} + \frac{(\Phi_{95} - \Phi_5)}{6.6} \quad (3)$$

$$SK = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - \Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} + \Phi_5)} \quad (4)$$

$$Kg = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (5)$$

式中: D 为土壤颗粒直径,mm。

平均粒径(d_0)为土壤粒度的平均分布状况,用于研究颗粒沉积规律和追踪颗粒移动过程^[18]。分选系数(σ_0)表示土壤颗粒分布的离散程度,数值越小越集中分选性越好^[19]。偏度(SK)能够反映土壤颗粒粗细的分布对称性^[17]。峰态(Kg)表示土壤粒径分布在平均粒径两侧的平均分布,数值越大,表明样品粒度分布越集中,说明一部分颗粒物是未曾受到环境的影响直接进入新环境之中^[20]。

土壤颗粒的分形维数(D)为无量纲统计参数,可定量描述土壤颗粒的分布组成,从而反映土壤结构的一致性和稳定性,利用颗粒组成和分形维数来描述土壤颗粒径分布的均匀程度。以 Mastersizer 3000 激光粒度仪所检测的粒径体积分数据计算得到分形维数(D),计算公式为:

$$\frac{V_{(r < R_i)}}{V_t} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} \quad (6)$$

式中: D 为土壤分形维数; r 为土壤颗粒直径,mm; R_i 为某一径级土壤颗粒直径,mm; $V_{(r < R_i)}$ 为小于 R_i 径级颗粒的土壤颗粒体积百分比,%; V_t 为各径级颗粒总体积百分比,%; $R_{\max}$ 为最大颗粒直径,mm。

1.3.2 环刀实验 1)野外数据采集。于 2023 年 7 月 26 日,对所选取的风蚀坑不同部位上风口随机位置,纵向挖取土壤剖面,设置为宽度 2 m、长度 3 m、深度 2 m,土壤表层画出坑口的基本轮廓,按阶梯状进行下挖,使土壤剖面一面为垂直平面,一面为阶梯状,为取样和观察提供帮助,按高度选取 8 个梯度,分别

为 0、20、40、60、80、100、150、200 cm,使用环刀纵向进行取样,每个处理取 3 个重复。

2)室内试验。取好的土样称重得到土壤鲜重,将环刀放入平底盘,加水至与环刀上沿齐平,吸水 12 h 后称重得到浸湿 12 h 后湿土质量,放置沙土上方控水 12 h 后,放置沙土上方控水 2 h 后称重得到浸湿 12 h 后搁置 2 h 湿土质量,继续放置沙土上方控水 24 h 后称重得到浸湿 12 h 后搁置 26 h 湿土质量,将环刀土样放置烘箱中设置温度 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘干 24 h 得到土壤干重。经过计算可得到土壤水分体积分、土壤体积质量、饱和含水水量、毛管持水量、田间持水量、非毛管孔隙度、毛管孔隙度和总孔隙度等指标。

3)计算方法。使用试验所测得的湿土质量、干土质量、浸湿 12 h 后湿土质量、浸湿 12 h 后搁置 26 h 湿土质量等数据进行计算^[21],计算公式为:

$$\text{土壤水分体积分} = \frac{100 \times (\text{土壤鲜重} - \text{土壤干重})}{\text{土壤干重}} \quad (7)$$

$$\text{土壤体积质量} = \frac{\text{土壤干重}}{\text{环刀体积}} \quad (8)$$

$$\text{饱和水分体积分} = \frac{100 \times (\text{浸湿 12 h 后湿土质量} - \text{土壤干重})}{\text{土壤干重}} \quad (9)$$

$$\text{毛管持水量} = \frac{100 \times (\text{浸湿 12 h 后搁置 2 h 湿土质量} - \text{土壤干重})}{\text{土壤干重}} \quad (10)$$

$$\text{田间持水量} = \frac{100 \times (\text{浸湿 12 h 后搁置 26 h 的湿土质量} - \text{土壤干重})}{\text{土壤干重}} \quad (11)$$

$$\text{非毛管孔隙度} = \frac{(\text{饱和水分体积分} - \text{毛管持水量}) \times \text{土壤体积质量}}{\text{水密度}} \quad (12)$$

$$\text{毛管孔隙度} = \frac{\text{毛管持水量} \times \text{土壤体积质量}}{\text{水密度}} \quad (13)$$

$$\text{总孔隙度} = \text{非毛管孔隙度} + \text{毛管孔隙度} \quad (14)$$

式中:环刀体积为 98.125 cm^3 ;水密度为 1 g/cm^3 。

1.4 数据分析

使用 Microsoft Excel 2010 软件进行整理统计,使用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行单因素方差分析方法和主成分分析计算其显著性和相关性分析,使用 Origin 2021 软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 土壤粒度组成特征

由图 4 可知,风蚀坑不同部位的机械组成主要以中砂为主,中砂的平均体积分数分别为 60.54%、60.88%、61.06%、54.75%、48.88%,CK 区的中砂体积分数最小,对风蚀坑不同部位的土壤颗粒组成进行分析,在 A 区、B 区、C 区、D 区和 CK 区的粉砂、极细砂、细砂、中砂表现为极显著差异($p\leq 0.01$),A 区黏粒体积分数为 0.65%,黏粒在 B 区和 C 区增加至 0.75%,D 区最高为 0.97%,CK 区为 0.89%。粉粒体积分数在 B 区为 5.65%,在 B 区和 C 区增加至 7.23%,D 区为 16.73%,CK 区最高,为 23.2%,C 区的中砂体积分数对比其他 4 个部位较高。在 A 区、B 区、C 区、D 区和 CK 区的黏粒和粗砂间差异显著($p\leq 0.05$),D 区的黏粒体积分数较高,B 区的粗砂体积分数较高。5 个部位的极粗沙基本为 0。

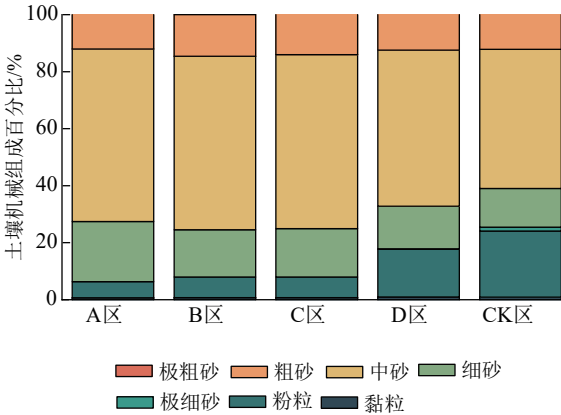


图 4 风蚀坑不同部位土壤机械组成

Fig. 4 Mechanical composition of soil in different parts of blowout pits

2.2 土壤粒度体积百分含量曲线

由图 5 可知,A 区的粒度体积分数众数峰值为 132.69~800.71 μm ,占总体的 92.85%,总体呈单峰形态排列。B 区的粒度体积分数众数峰值为 143.51~824.99 μm ,占总体的 92.04%,总体呈单峰形态排列。

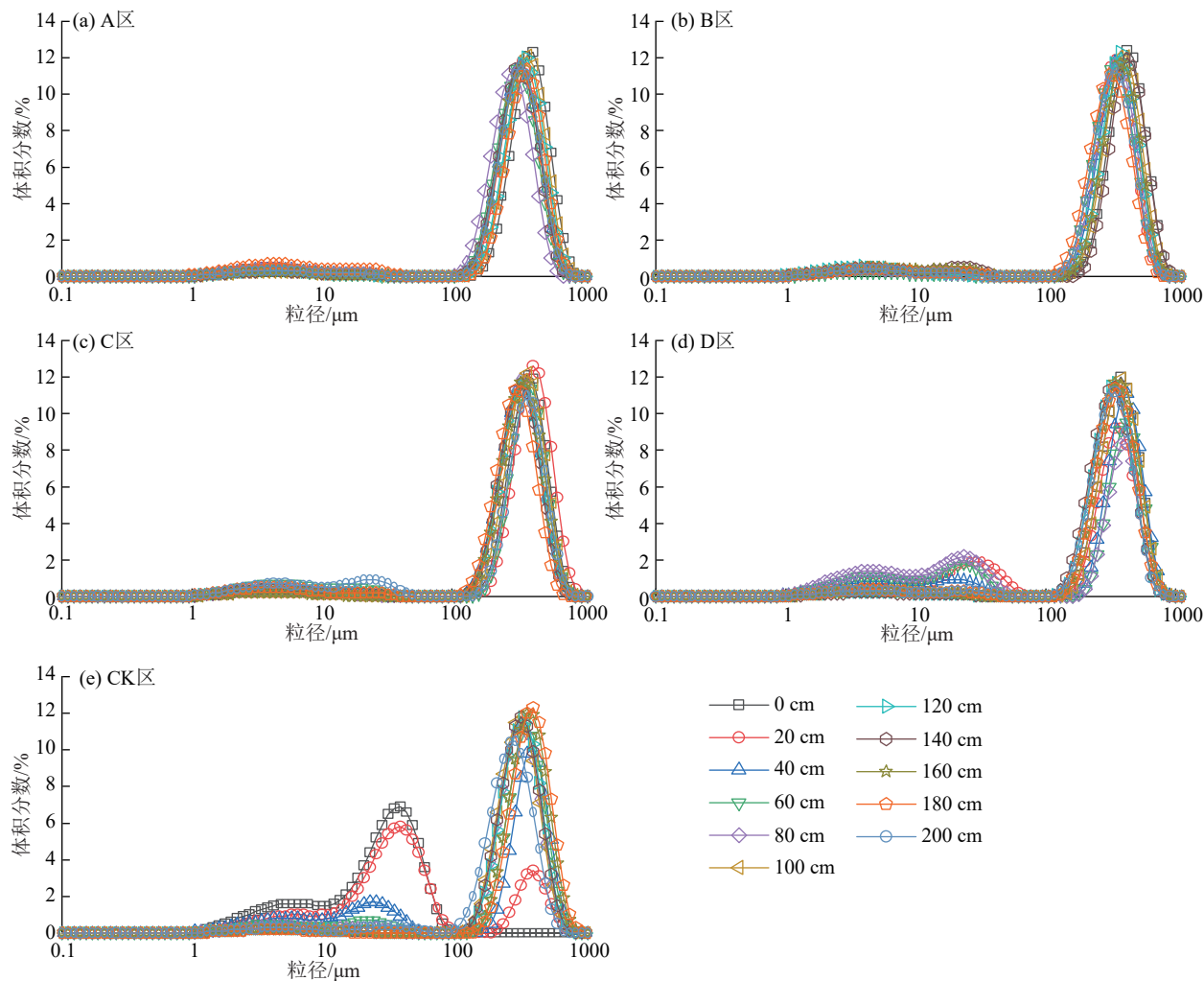


图 5 风蚀坑不同部位土壤粒度体积分数

Fig. 5 Soil particle size volume percentage curve in different parts of blowout pits

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

C 区粒度体积分数众数峰值为 140.50~832.34 μm , 占总体的 91.69%, 总体呈单峰形态。D 区的粒度体积分数众数峰值为 144.42~838.832 μm , 占总体的 83.99%, 部分样品为 0.948~49.08 μm , 占总体的 15.67%, 总体呈双峰形态。CK 区的粒度体积分数众数峰值为 130.531~896.768 μm , 占总体的 76.14%, 部分样品为 1.455~94.671 μm , 占总体的 23.54%, 总体呈双峰形态。说明 A 区、B 区和 C 区的土壤颗粒分布较其他 2 个区分布较为集中。

2.3 土壤粒度参数特征

风蚀坑不同部位的平均粒径大小为 B 区>A 区>C 区>D 区>CK 区。由图 6 可知, 在 B 区平均粒径最大 1.41 Φ , 风蚀坑呈沿主风向平均粒度变细。风蚀坑不同部位的分选系数总体分选性较差, 其中, D 区的分选性最差。风蚀坑不同部位的峰态值表现为 CK 区峰态尖窄, D 区和 C 区峰态很尖窄, A 区和 B 区峰态非常尖窄。风蚀坑不同部位的偏度均呈极正偏, 但 D 区相对于其他 3 个典型部位更加正向偏斜, 说明风蚀坑粗颗粒较少。风蚀坑不同部位的分形维数总体为 2.1~2.2, 数值变化幅度不大。

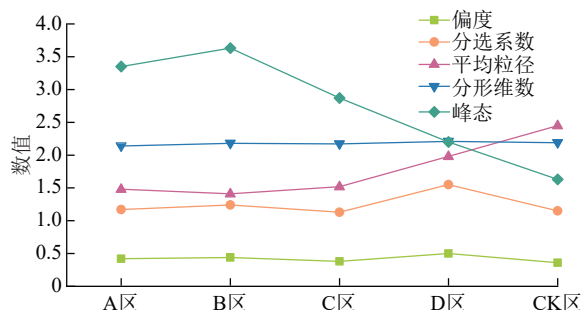


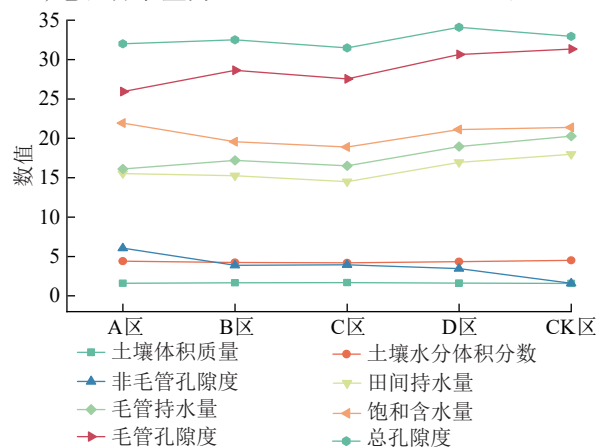
图 6 风蚀坑不同部位粒径参数变化特征

Fig. 6 Variation characteristics of soil particle size parameters in different parts of blowout pits

2.4 土壤物理特征参数

风蚀坑不同部位的土壤物理特征参数间具极显著相关($p \leq 0.01$), 由图 7 可知, 风蚀坑不同部位的土壤体积质量为 1.55~1.70 g/cm^3 , CK 区的土壤体积质量最小, 重度覆沙区的土壤体积质量最大, 相较 CK 区重度覆沙区增加 6%。CK 区和边缘区的土壤水分体积分数远远高于其他 3 个部位, CK 区的土壤水分体积分数比重度积沙区的土壤水分体积分数增加 7%。风蚀坑不同部位非毛管孔隙度变化趋势为沿主风向(西北风)递减, 而毛管孔隙度沿主风向(西北风)大体递增。总孔隙度是毛管孔隙度和非毛管孔隙度的总和, 其趋势大体为 31%~34%, 变化幅度不大。风蚀坑不同部位的毛管持水量与毛管孔隙度的变化趋势一致。风蚀坑 4 个典型部位的田间持水量依次为 D 区>A 区>B 区>

C 区, 饱和含水量为 A 区>D 区>B 区>C 区。



注: 土壤体积质量单位为 g/cm^3 ; 其他单位均为 %。

图 7 风蚀坑不同部位土壤物理特征参数变化

Fig. 7 Changes of soil physical characteristic parameters in different parts of blowout pits

3 讨论

3.1 风蚀坑不同部位 0~200 cm 土层土壤粒径参数变化特征

由图 8a 可知, 平均粒径在 0~60 cm 处, CK 区的土壤颗粒远小于其他 4 个部位, 在风蚀作用下, A 区、B 区、C 区、D 区的土壤颗粒总体粗化。风蚀对 4 个部位 0 cm 处影响大体一致, 平均粒径为 1.16~1.33 Φ , 但在 20~60 cm 处, D 区的平均粒径细化明显, 并且于 80 cm 处大于 CK 区, 达到 4 个部位最大值 3.23 Φ , 在 100 cm 处 4 个部位达到谷值, 但与 CK 区的平均粒径差值减少至 0.2 Φ 。在 120~200 cm 处 4 个部位的平均粒径在风蚀作用下明显变细, 与 CK 区的趋势相反, 在 160 cm 处 4 个部位的平均粒径均高于 CK 区, 受到降水和地下水的影响, 细小土壤颗粒同水分下渗, 导致 C 区成为土壤颗粒最细的部位。

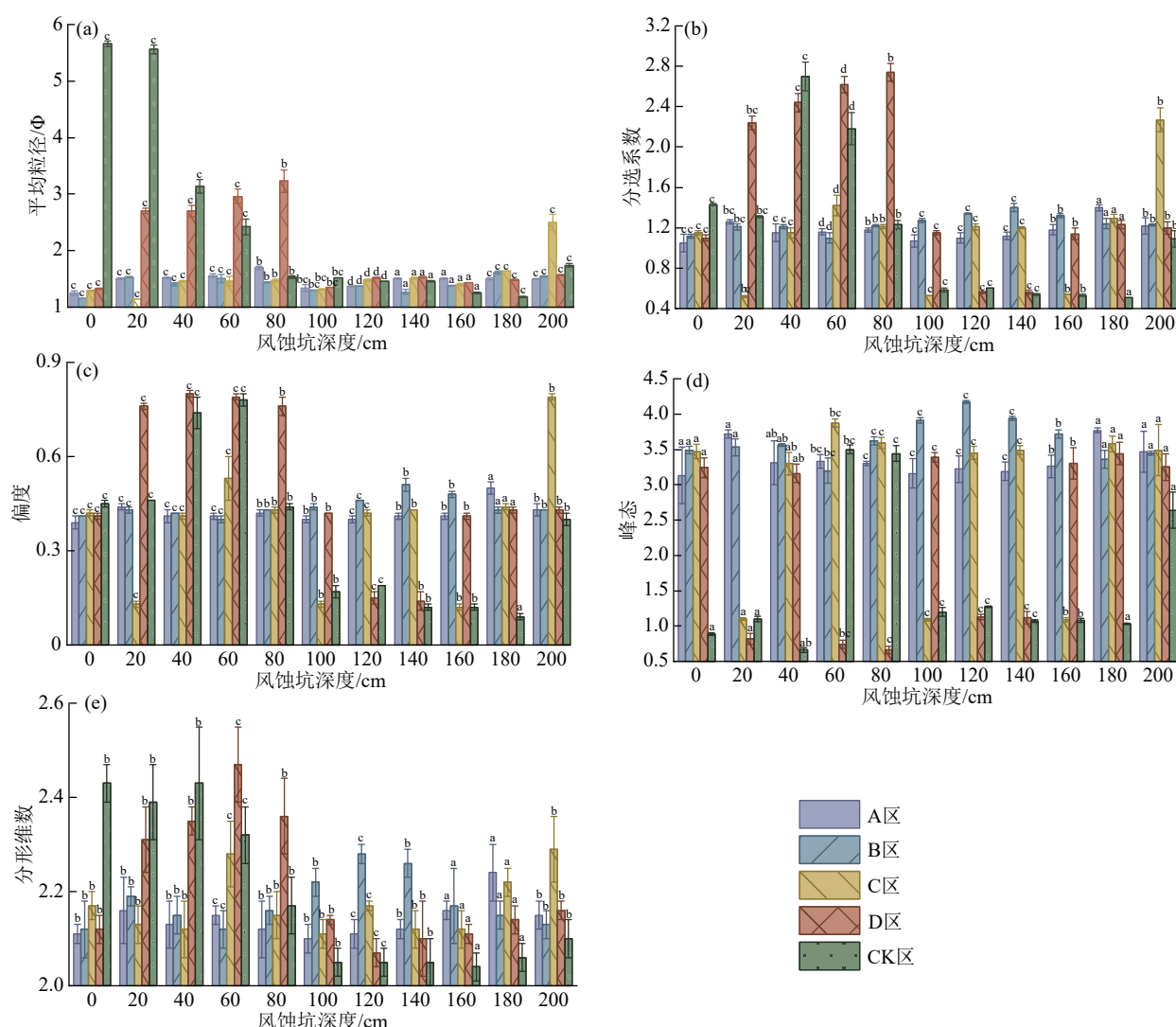
由图 8b 可知, 风蚀坑 0 cm 处, 风沙流增强土壤颗粒的分选性, 4 个典型部位的分选系数都呈分选性极好, CK 区呈分选性好, 说明风沙流对 4 个典型部位的分选作用较强, 与解云虎^[22]的研究结论一致。CK 区的植被覆盖导致分选性的差异, 与苏松领等^[23]研究结果一致。风沙流对 20 cm 处的 C 区影响最大, D 区的影响最小, 是因为风沙流在该部位减弱, 携带的沙粒沉降, 导致该部位分选性降低。40~80 cm 处 CK 区土壤分选系数不断下降, 因植物在生长过程中根系不断对土壤颗粒进行扰动, 与李嘉楠等^[24]对荒漠-绿洲过渡带典型固沙植物根区土壤的研究结论一致, D 区附有植被覆盖, 分选性与 CK 区相似, 其他 3 个部位基本维持不变。100~180 cm 处, 降水是 CK 区的分选系数下降的主要原因, 降水过程中,

入渗使土壤颗粒发生垂直移动,浅层土粒被翻到深层。任利东等^[25]通过砂质土壤蒸发试验得出,入渗阶段导致细土壤颗粒向下层土壤沉积。冻融改变土壤颗粒间隙,春季融化对土壤颗粒进行重新分选,与王艺璇等^[26]冻融影响土壤颗粒排列方式的研究结论一致。C区100、160 cm处和D区120~140 cm处植物和风沙流影响较小,因其水分体积分数较高,进而提升分选性。200 cm处CK区和C区的分选系数显著提升,并且C区的分选系数达到峰值,因其受地下水的影 响较为严重,表层细砂剥离后,土壤细颗粒随水分下渗,残留剩余土壤粗颗粒在200 cm处形成堆积。

由图8c可知,风蚀坑4个部位和CK区呈正偏分布,与张惜伟等^[27]对呼伦贝尔沙地风蚀坑地表粒径研究所得结论一致,说明风蚀坑整体以小颗粒为主。0 cm处因其4个部位受风蚀和风沙流的影响较强,基本分布一致,在20~80 cm处,D区受到削弱后的风沙

流影响小颗粒集中;20 cm处C区集中降低,说明在风沙流和风蚀作用下,土壤小颗粒减少,与原有土壤大颗粒结合;100~160 cm处,D区开始减少,说明风沙流和风蚀的作用减少,基本与CK区的颗粒集中一致,呈“U”形下降后升高;C区与D区相反趋势变化,说明在风蚀和风沙流影响下,2个相近部位有相互补充的现象;在180~200 cm处,典型的4个部位颗粒集中增加,说明多年风蚀已经作用到深层土壤,对C区的影响最大。

由图8d可知,0~180 cm处风蚀坑4个典型部位的峰态都基本为3.0左右,与王中原等^[28]对共和盆地高寒草原风蚀坑表层沉积物粒度的研究所得结论一致,说明4个部位的沉积颗粒物受风沙流影响,从外部环境直接进入风蚀坑,快速沉积,未受到环境变化影响。在20~140 cm处轻度积沙区的峰态集中在宽平,说明其受到风蚀影响时间较短。



注:图柱上方不同小写字母表示相同土层不同指标间差异显著($p < 0.05$)。

图8 风蚀坑不同部位土壤粒径参数

Fig. 8 Soil particle size parameters in different parts of blowout pits

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

由图 8e 可知, 0 cm 处 4 个部位均处于低分形维数, 说明受风蚀影响和风沙流沙埋引起植被退化, 与郭子玥等^[29]指出风沙流引起沙埋导致风蚀坑植被退化, 并使表层土壤粗化的结论一致。在 20~80 cm 处, 轻度覆沙区的分形维数较高, 在 60 cm 处达到峰值, 原有土壤结构被破坏, 风蚀和风沙流使其土壤颗粒排列变复杂, 携带的黏粒粉粒进入原有土壤缝隙之中, 其他 3 个部位受风蚀和风沙流的影响较大, CK 区的分形维数数值开始下降, 说明植被根系的分布开始减少。80~200 cm 处, 4 个部位基本均呈先降低后增加趋势, 说明 4 个典型部位受风蚀和风沙流影响程度不同, 依次为 B 区>C 区>A 区>D 区, CK 区趋势不变, 在低分形维数范围, 说明草原原有深度土壤颗粒排列简单, 黏粒、粉粒质量分数较小, 与陈橙等^[30]研究结论一致。

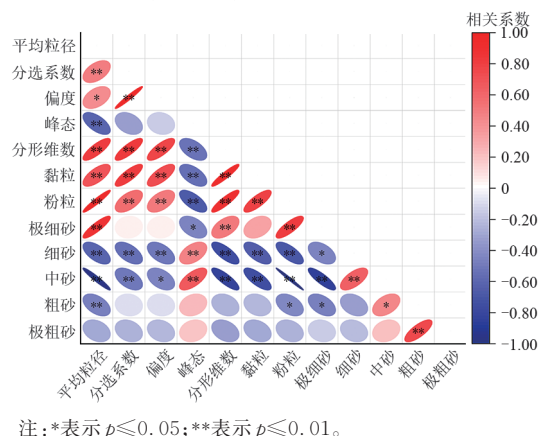
3.2 风蚀坑粒径参数与土壤机械组成 Pearson 相关性分析

由图 9 可知, 平均粒径与黏粒、粉粒和极细砂呈强正相关($p \leq 0.01$), 与耿婉璐^[31]研究结论一致, 即平均粒径与细砂和中砂呈强负相关($p \leq 0.01$); 分选系数与黏粒、粉粒呈强正相关($p \leq 0.01$), 与细砂、中砂呈强负相关($p \leq 0.01$), 与吴惠敏^[32]对库布齐沙漠土壤理化性质研究中得到的黏粒、粉粒与分选系数存在正相关结论一致; 偏度与黏粒、粉粒呈强正相关($p \leq 0.01$), 与细砂呈强负相关($p \leq 0.01$), 与中砂呈负相关($p \leq 0.05$)。峰态与黏粒、粉粒呈强负相关($p \leq 0.01$), 与细砂、中砂呈强正相关($p \leq 0.01$), 与极细砂呈负相关($p \leq 0.05$), 与丁延龙等^[18]对希拉穆仁荒漠草原风蚀地表颗粒粒度研究中的结论一致。风蚀坑整体的分形维数与土壤机械组成的黏粒、粉粒和极细砂百分含量呈强正相关($p \leq 0.01$), 与中砂呈强负相关($p \leq 0.01$), 与张惜伟^[13]在典型沙质草原风蚀坑演化过程与发育机理研究结论一致, 即与细砂呈强负相关($p \leq 0.01$)。

3.3 风蚀坑土壤机械组成与土壤水分体积分数 PCA 主成分分析

由图 10 可知, 通过对土壤水分体积分数同土壤机械组成进行主成分分析, PC1 轴可解释土壤机械组成影响土壤水分体积分数的 58.2%, PC2 轴可解释土壤机械组成影响土壤水分体积分数的 20.8%, 2 个主成分累计贡献率达到 79%。PC1 主导样本中大部分的变异, 主要受土壤水分体积分数、粉粒和极细砂等变量的贡献影响, 而 PC2 则反映次要的变异, 主要与粗砂和极粗砂相关。样本组别的分布和变量载荷共同揭示各组间的差异及变量对样本分布的驱动机制。土壤水分体

积分数与土壤机械组成中的黏粒、粉粒、细砂和极细砂夹角为锐角呈正相关, 与 ZHANG 等^[33]对于旱年黄土高原坡面土壤水分体积分数与粉粒、黏粒和细砂质量分数呈正相关的结论一致。土壤水分体积分数与土壤机械组成中的中砂、粗砂、极粗砂夹角为钝角呈负相关, 与唐庄生等^[34]对荒漠草原在沙漠化过程中, 土壤中粗砂粒与土壤水分体积分数呈负相关。



注: *表示 $p \leq 0.05$; **表示 $p \leq 0.01$ 。

图 9 风蚀坑粒径参数与土壤机械组成 Pearson 相关性

Fig. 9 Pearson correlation analysis between soil particle size parameters and mechanical composition of blowout pits

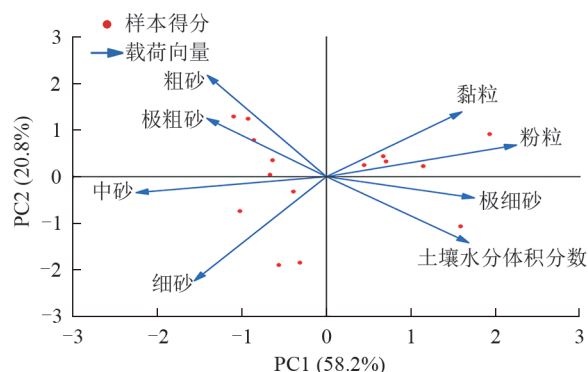


图 10 风蚀坑机械组成与土壤水分含量主成分分析

Fig. 10 Principal component analysis of the mechanical composition and soil water content of blowout pits

4 结论

1) 风蚀坑不同部位的机械组成以中砂为主, 平均粒径为 B 区>A 区>C 区>D 区>CK 区, 总体沿主风向(西北风)平均粒度变细。分形维数总体为 2.1~2.2。

2) 风蚀坑不同部位的土壤体积质量为 1.55~1.70 g/cm³。土壤水分体积分数为 CK 区>A 区>D 区>B 区>C 区, 田间持水量为 CK 区>D 区>A 区>B 区>C 区, C 区持水能力最差, D 区持水能力最强。

3) 风蚀坑的土壤颗粒总体呈粗化, 20~80 cm 处 D 区的分选性高于其他 3 个部位。风蚀坑总体呈正偏分布, 0~180 cm 处风蚀坑典型部位峰态在 3.0 左右极尖窄。0 cm 处风蚀坑典型部位属于低分形维数; 20~80 cm 处 D 区分形维数较高。

4)风蚀坑不同部位的土壤水分体积分数与土壤机械组成中的黏粒、粉粒、细砂、极细砂呈正相关,与土壤机械组成的中砂、粗砂、极粗砂呈负相关。分形维数与土壤机械组成的黏粒、粉粒和极细砂呈正相关,与中砂、细砂呈强负相关。

本文尚存一定的局限性,主要为所选风蚀坑仅能代表呼伦贝尔沙地典型风蚀坑的基本特征,对于风蚀坑的不同地域性差距不能完全体现,在后续研究中可以扩大样本库,对本文所得的结论进行验证。

参考文献:

- [1] 李雨薇,王博,包玉海,等.草原风蚀坑发育对土壤生态化学计量的影响[J].中国沙漠,2023,43(5):166-175.
LI Y W, WANG B, BAO Y H, et al. Effects of the development of grassland blowouts on soil ecological stoichiometry[J].Journal of Desert Research,2023,43(5):166-175.
- [2] 庄燕美,哈斯.沙丘风蚀坑的形态及动力过程的研究进展[J].干旱区地理,2005,28(5):632-637.
ZHUANG Y M, HA S. Progress of the study on shapes and dynamical process of blowouts on dunes [J]. Arid Land Geography,2005,28(5):632-637.
- [3] 袁立敏,杨制国,薛博,等.呼伦贝尔草原风蚀坑土壤水分异质效应研究[J].干旱区研究,2022,39(5):1598-1606.
YUAN L M, YANG Z G, XUE B, et al. Heterogeneity of soil moisture of blowouts in Hulunbuir grassland [J]. Arid Zone Research,2022,39(5):1598-1606.
- [4] HESP P. Foredunes and blowouts: Initiation, geomorphology and dynamics [J]. Geomorphology, 2002, 48(1/2/3):245-268.
- [5] 阎旭,张德平,夏显东,等.呼伦贝尔沙质草原风蚀坑形态发育模式分析[J].中国沙漠,2009,29(2):212-218.
YAN X, ZHANG D P, XIA X D, et al. Morphology and developmental mode of blowouts in Hulunbuir sandy grassland, China [J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(2):212-218.
- [6] KIMIA C A A, IAN J W A, PATRICK A H, et al. Spatial-temporal evolution of aeolian blowout dunes at Cape Cod [J]. Geomorphology, 2015, 236:148-162.
- [7] 杨娟,高永,王瑞东,等.沙质草原风蚀坑土壤粒度组成及养分特征[J].中国农业科技导报,2024,26(10):186-194.
YANG J, GAO Y, WANG R D, et al. Soil particle composition and nutrient characteristics of wind erosion pits in sandy grassland [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(10):186-194.
- [8] 包志鑫,袁立敏,武红燕,等.呼伦贝尔草原风蚀坑植物分布空间异质效应[J].干旱区研究,2024,41(7):1185-1194.
BAO Z X, YUAN L M, WU H Y, et al. Distribution characteristics of vegetation around blowout in the Hulunbuir grassland [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(7):1185-1194.
- [9] 白晨赞,余小玲,马琛琛,等.梯田侧壁显著影响黄土塬区梯田土壤水分空间分布[J].水土保持学报,2024,38(6):105-112.
BAI C Y, YU X L, MA C C, et al. The terraced walls significantly influence the spatial distribution of soil water in terraced areas on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6):105-112.
- [10] 李静芸,傅天阳,申玉龙,等.毛乌素沙地新月形和抛物线形沙丘表层沉积物粒度特征[J].中国沙漠,2023,43(2):226-232.
LI J Y, FU T Y, SHEN Y L, et al. Grain-size characteristics of surface sediments of barchan and parabolic dunes in the Mu Us Desert [J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(2):226-232.
- [11] 俞鑫晨,李鸿威,杨小平,等.浑善达克沙地沉积物粒度特征及其指示意义[J].地理学报,2023,78(7):1809-1824.
YU X C, LI H W, YANG X P, et al. Grain size characteristics of sediments in the Hunshandake sandy land and its implications [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(7):1809-1824.
- [12] 张悦仪,迟云平,谢远云,等.科尔沁沙地地表沉积物特征及其气候意义[J].中国沙漠,2024,44(4):223-235.
ZHANG Y Y, CHI Y P, XIE Y Y, et al. Characteristics and climate significance of surface sediments in the Horqin sandy land [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(4):223-235.
- [13] 张惜伟.典型沙质草原风蚀坑演化过程与发育机理研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
ZHANG X W. Study on evolution process and development mechanism of blowouts in typical sandy grassland [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.
- [14] MALAKOUTI M J, LEWIS D T, STUBBENDIECK J. Effect of grasses and soil properties on wind erosion in sand blowouts [J]. Journal of Range Management, 1978, 31(6):e417.
- [15] HESP P A, WALKER I J. Three-dimensional aeolian dynamics within a bowl blowout during offshore winds: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada [J]. Aeolian Research, 2012, 3(4):389-399.
- [16] 周炎广,陈惠中,管超,等.呼伦贝尔沙地风蚀坑粒度特征及其环境意义[J].中国沙漠,2018,38(4):724-733.
ZHOU Y G, CHEN H Z, GUAN C, et al. Grain size characteristics of the blowout and its environmental significance in the Hulunbuir sandy land, China [J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(4):724-733.
- [17] 杜芳悦,刘俊娥,牛百成,等.青藏高原—黄土高原过渡带土壤抗冲性及影响因素[J].水土保持研究,2025,32(1):39-47.
DU F Y, LIU J E, NIU B C, et al. Soil anti-scourability and influencing factors in the transition zone between the Qinghai-Xizang Plateau and Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1):39-47.
- [18] 丁延龙,高永,蒙仲举,等.希拉穆仁荒漠草原风蚀地表

- 颗粒粒度特征[J]. 土壤, 2016, 48(4): 803-812.
- DING Y L, GAO Y, MENG Z J, et al. Particle size characteristics of wind erosion surface soil in the desert steppe[J]. Soils, 2016, 48(4): 803-812.
- [19] 蔡佳乐, 蒙仲举, 罗建国, 等. 两种典型防护林对查干淖尔干盐湖沙化地表土壤粒度特征的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 179-187.
- CAI J L, MENG Z J, LUO J G, et al. Effects of two typical protection forests on particle size characteristics of surface soil in sandy land in Qehan dry salt lake[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 179-187.
- [20] 李天扬, 蒙仲举, 陈晓燕, 等. 不同混交林配置模式对库布齐沙漠风沙土壤粒度特征的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 101-109.
- LI T Y, MENG Z J, CHEN X Y, et al. Effects of different mixed forest configuration modes on the grain size characteristics of aeolian sandy soil in Kubuqi Desert[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 101-109.
- [21] 杜姣姣, 周运超, 白云星, 等. 阔叶树种引入后马尾松人工林土壤水文物理性质研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 105-112.
- DU J J, ZHOU Y C, BAI Y X, et al. Research of soil hydrophysical properties of pinus massoniana plantation after the introduction of broad-leaved tree species[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 105-112.
- [22] 解云虎. 荒漠-绿洲过渡带防护体系构建及其防风阻沙效益研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- XIE Y H. Study on construction of protection system and the benefits of wind and sand control in desert-oasis ecotone[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.
- [23] 苏松领, 毛东雷, 赵枫, 等. 新疆策勒不同荒漠化程度下地表沉积物粒度及分形特征[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(11): 127-134.
- SU S L, MAO D L, ZHAO F, et al. Grain size and fractal characteristics of surface sediments under different desertification degrees in Cele, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(11): 127-134.
- [24] 李嘉楠, 周成乾, 胡广录, 等. 荒漠-绿洲过渡带典型固沙植物根区土壤大孔隙特征及影响因素[J]. 干旱区研究, 2024, 41(12): 2015-2026.
- LI J N, ZHOU C Q, HU G L, et al. Characteristics and influencing factors of soil macropores in the root zone of sand-fixing plants in the desert-oasis transition zone[J]. China Industrial Economics, 2024, 41(12): 2015-2026.
- [25] 任利东, 黄明斌. 砂性层状土柱蒸发过程实验与数值模拟[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1282-1289.
- REN L D, HUANG M B. Experiment and numerical simulation of soil evaporation from layered sandy soil columns[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(6): 1282-1289.
- [26] 王艺璇, 仲秋维, 郑昕雨, 等. 冻融循环对土壤性状特征影响研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2022(10): 231-240.
- WANG Y X, ZHONG Q W, ZHENG X Y, et al. Research progress on the effects of freeze-thaw cycles on soil properties[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(10): 231-240.
- [27] 张惜伟, 汪季, 海春兴, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑地表风沙流结构特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1505-1511.
- ZHANG X W, WANG J, HAI C X, et al. Structure of drifting sand flow over the surface of blowouts in the Hulunbuir sandy grasslands[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(6): 1505-1511.
- [28] 王中原, 罗万银, 董治宝, 等. 共和盆地高寒草原风蚀坑表层沉积物粒度特征及动力学意义[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 7-16.
- WANG Z Y, LUO W Y, DONG Z B, et al. Grain size characteristics of the blowout surface sediments and its aerodynamic significance in the alpine meadow region of the Gonghe basin[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(1): 7-16.
- [29] 郭子玥, 海春兴, 解云虎. 沙质草原风蚀坑发育及防治技术研究综述[J]. 内蒙古林业, 2023(8): 34-37.
- GUO Z Y, HAI C X, XIE Y H. Study on the development and control technology of wind erosion pit in sandy grassland[J]. Inner Mongolia Forestry, 2023(8): 34-37.
- [30] 陈橙, 王丹, 杨成松, 等. 冻土未冻水含量与其微结构相关试验分析研究[J]. 冰川冻土, 2024, 46(3): 944-955.
- CHEN C, WANG D, YANG C S, et al. Experimental analysis and study on the relationship between unfrozen water content and microstructure in frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024, 46(3): 944-955.
- [31] 耿婉璐. 红树林宜林滩涂造林修复适宜性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- GENG W L. Study on suitability of afforestation and restoration of intertidal zone for Mangrove[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [32] 吴惠敏. 西鄂尔多斯地区沙冬青及伴生种群落分布对土壤理化性质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- WU H M. The effect of community distribution of *Ammopiptanthus mongolicus* and its associated species on soil physical and chemical properties in western Ordos Regio[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [33] ZHANG X, ZHAO W W, WANG L X, et al. Relationship between soil water content and soil particle size on typical slopes of the Loess Plateau during a drought year[J]. Science of the Total Environment, 2019, 648: 943-954.
- [34] 唐庄生, 安慧, 邓蕾, 等. 荒漠草原沙漠化植物群落及土壤物理变化[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 991-1000.
- TANG Z S, AN H, DENG L, et al. Changes in the plant community and soil physical properties during grassland desertification of steppes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): 991-1000.