

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.03.022

CSTR:32310.14.stbxb.2026.03.022

代豫杰,赵建玲,董智,等.天然灌木林下风沙土粒径分布对重金属污染的影响[J].水土保持学报,2026,40(3):301-310.

DAI Yujie, ZHAO Jianling, DONG Zhi, et al. Influence of particle size distribution of aeolian sandy soil on heavy metal contamination under natural shrublands[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3): 301-310.

天然灌木林下风沙土粒径分布对重金属污染的影响

代豫杰¹, 赵建玲¹, 董智², 李锦荣³, 郭建英³, 高君亮⁴

(1. 宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021; 2. 山东农业大学林学院, 山东 泰安 271018; 3. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 4. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古 巴彦淖尔 015200)

摘要: [目的] 沙漠中风沙土的理化性质可较清晰准确反映土壤自然特性及环境健康状态,但其粒径分布(PSD)规律、重金属污染(HMC)状况、PSD变化是否及如何影响HMC等关键科学问题仍待阐明。[方法] 挖取乌兰布和沙漠流动沙丘及沙冬青、花棒、猫头刺、白刺和梭梭天然灌木林下的不同深度风沙土,借助粒径统计学参数及分形理论揭示风沙土PSD规律,通过污染因子(P_f)、地累积指数(I_{geo})、改进的内梅罗指数(N_f)评价风沙土HMC,利用冗余分析(RDA)及结构方程模型(SEM)明确PSD变化怎样影响HMC。[结果] 1)风沙土平均粒径(M_z)、分选系数(σ)、偏度(Sk)、峰态(K_g)均随土层深度增加明显变化。白刺、花棒林分别显著增加、降低风沙土 M_z ($p < 0.05$)。2)天然灌木林降低风沙土单重分形维数 D 值及多重分形维数中的 D_1 值,增大 D_0 值及 D_1/D_0 值,表明灌木林提升土壤粗颗粒比例、PSD范围及离散程度降低PSD均匀程度,其中沙冬青及花棒林的作用效果最明显。3)整体而言,风沙土HMC较轻,不同灌木林对HMC的影响并无明显一致规律。4)RDA及SEM结果显示,风沙土细颗粒含量与 K_g 的提升及 M_z 的减小是HMC降低的主要原因,且原因分为直接与间接2种。[结论] 灌木林下风沙土细颗粒含量、 M_z 、 K_g 变化是影响HMC的主要因素,且细颗粒含量变化的影响效果最为明显。研究结果可为明晰风沙土原生特性及环境健康状态提供科学依据。

关键词: 风沙土; 粒度特征; 重金属污染; 天然灌木林; 乌兰布和沙漠

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0301-10

Influence of Particle Size Distribution of Aeolian Sandy Soil on Heavy Metal Contamination under Natural Shrublands

DAI Yujie¹, ZHAO Jianling¹, DONG Zhi², LI Jinrong³, GUO Jianying³, GAO Junliang⁴

(1. School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. College of Forestry, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 3. Pastoral Water Conservancy Science Research Institute of the Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China; 4. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Bayannur, Inner Mongolia 015200, China)

Abstract: [Objective] The physicochemical properties of aeolian sandy soil in deserts can accurately reflect soil natural characteristics and environmental health status. However, key scientific questions regarding the patterns of its particle size distribution (PSD), the status of heavy metal contamination (HMC), and whether and how changes in PSD affect HMC remain to be clarified. [Methods] Aeolian sandy soil at different depths were collected from mobile dunes and natural shrublands of *Ammopiptanthus mongolicus* (Maxim. ex Kom.) S. H. Cheng, *Hedysarum scoparium* (Fisch. & C. A. Mey.), *Oxytropis aciphylla* Ledeb., *Nitraria tangutorum* Bobrov, and *Haloxyylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge in the Ulan Buh Desert. The PSD patterns of the aeolian sandy soil were revealed using particle size statistical parameters and fractal theory. HMC of the soil was

收稿日期: 2025-10-31

修回日期: 2025-11-24

录用日期: 2025-12-25

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-03-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(42071021); 内蒙古自治区防沙治沙科技创新重大示范工程项目(2024JBGS0013); 宁夏自然科学基金项目(2024AAC05026); 内蒙古自然科学基金项目(2022MS03070)

第一作者: 代豫杰(1992—), 男, 博士, 讲师, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: daiyj_sdau@163.com

通信作者: 董智(1971—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: nmgdz@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

evaluated using the contamination factor (P_f), geo-accumulation index (I_{geo}), and improved Nemerow index (N_f). Redundancy analysis (RDA) and structural equation model (SEM) were used to elucidate how PSD changes affected HMC. [Results] 1) The mean particle size (M_z), sorting coefficient (σ), skewness (Sk), and kurtosis (K_G) of the aeolian sandy soil all showed significant changes with increasing soil depth. *N. tangutorum* and *H. scoparium* shrublands significantly increased and decreased the M_z of the aeolian sandy soil, respectively ($p < 0.05$). 2) Natural shrublands decreased the mono-fractal dimension (D) and the entropy dimension (D_1) of the multi-fractal spectrum of the aeolian sandy soil, while increasing the capacity dimension (D_0) and the D_1/D_0 ratio. This indicated that shrublands increased the proportion of coarse particles, the PSD range, and the degree of dispersion, but decreased the PSD uniformity. The effects were most pronounced under *A. mongolicus* and *H. scoparium* shrublands. 3) Overall, the HMC of the aeolian sandy soil was relatively light, and the influence of different shrublands on HMC did not show a clear consistent pattern. 4) RDA and SEM results indicated that increases in fine particle content and K_G , along with the decrease in M_z of the aeolian sandy soil, were the main reasons for the reduction in HMC, and these reasons were categorized into direct and indirect effects. [Conclusion] Changes in fine particle content, M_z , and K_G of aeolian sandy soil under shrublands are the main factors influencing HMC, and the effect of changes in fine particle content is the most significant. The findings provide a scientific basis for clarifying the inherent properties and environmental health status of aeolian sandy soil.

Keywords: aeolian sandy soil; particle size characteristics; heavy metal contamination; natural shrubland; Ulan Buh Desert

Received: 2025-10-31

Revised: 2025-11-24

Accepted: 2025-12-25

Online(www.cnki.net): 2026-03-23

土壤是供重金属等地球化学元素赋存及植被依附的重要载体,粒径分布(PSD)是其最基本的物理特性之一,既决定粗细颗粒配比及变化趋势等重要属性^[1-3],又与重金属吸附固定作用紧密相关^[4-7]。分形理论是量化具有分形特征的不规则几何体的最佳方法^[8],可很好地反映土壤这一复杂疏松多孔载体的几何特征^[2-3,5,9]。其中单重分形维数体现 PSD 的整体均匀状况^[10],而多重分形维数还可细致反映 PSD 的范围及分散程度等重要信息^[2-3,8]。此外,粒径的统计学参数揭示出平均值及分选等基础特性,也是粒度研究的常用基本指标^[10-12]。可见,综合分形理论及统计学参数可更完整准确理解土壤粒度特征,有助于全面明晰 PSD 规律。然而,综合运用上述指标完整解答土壤 PSD 的研究仍需加强,尤其是针对风沙土的相关研究尚显不足^[5-6,9,11-13]。风沙土主要存在于沙漠或戈壁地区,理化性质主要受植被生长状况及风况等自然条件影响而受人为干扰较小^[5,13-16],可较清晰准确地反映土壤原生特性及环境健康状态,在研究 PSD、重金属含量等土壤理化属性方面具有天然优势。

土壤重金属含量与 PSD 紧密相关^[4-7],若超标将体现为重金属污染(HMC)并引发严重的环境风险。风沙土的重金属含量显著正比于土壤粉粒含量、显著反比于中砂含量^[5],粒径越细且细颗粒越

多,则土壤对重金属的吸附固定作用越明显^[4],粒径 $< 50 \mu\text{m}$ 的颗粒可吸附大多数重金属,且黏粒($< 2 \mu\text{m}$)的作用效果较突出^[17]。尽管如此,粒径稍大的颗粒对重金属同样有不可忽视的吸附固定作用, $< 150 \mu\text{m}$ 的颗粒占比高时可显著增强土壤对重金属的吸附效率,且细颗粒对 Cd、Pb 的固定效率较为相似;此外,颗粒分选状况及相应的颗粒间相互作用同样明显影响重金属的稳定性及吸附固定效果^[4]。可见,摸清土壤 PSD 规律将明显有助于明晰重金属污染状况,进而更好掌握区域土壤健康状态。然而,虽然重金属优先依附的颗粒粒径范围已相对明确^[4,7,17],且与粗、细颗粒的相关关系已较为清晰^[5-6],但对于沙漠地区及风沙土 HMC 及其与 PSD 关系的关注仍待提升,特别是选用哪些粒径参数量化粒度对重金属污染的影响,以及怎样影响等科学问题尚需解答。

乌兰布和沙漠位于我国西北腹地,有黄河穿行且植被自然生长状况较好。沙漠地区植被对风沙土 PSD 的影响来自拦截风沙流、固定流沙等作用^[5,11,13],而对 HMC 影响的主要原因则是颗粒作用及根系吸收作用^[5,18-19]。天然灌木林常见于乌兰布和沙漠,是拦滞风沙活动的主要力量,影响风沙土 PSD 及重金属含量的分布^[5]。基于此,以乌兰布和沙漠流动沙丘及天然灌木林下的风沙土为研究对象,综合运用分

形理论及统计学参数量化 PSD 规律,结合多项评价指标反映 HMC,遴选合理粒径参数并揭示其对 HMC 的影响,从而凸显粒度变化的作用。研究结果可为明晰风沙土粒径规律及环境健康状态,选育优良灌木补植品种及原位固控重金属污染提供科学依据,具有理论及现实价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选在乌兰布和沙漠腹地(39°30′16″~40°19′49″N, 105°43′36″~107°00′42″E),属中温带大陆性干旱季风气候,年平均气温 8.0℃,多年平均降水量及蒸发量分别为 142.7、32.0 mm;多年主风向为西风及西南风,年平均风速为 3.7 m/s,多年平均大风日数 10~32 d,土壤类型主要为风沙土,沙丘高度 4~10 m,且多为流动沙丘。主要有梭梭 [*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge]、花棒 [*Hedysarum scoparium* (Fisch. & C. A. Mey.)]、白刺 (*Nitraria tangutorum* Bobrov)、沙冬青 [*Ammopiptanthus mongolicus* (Maxim. ex Kom.) S. H. Cheng]等旱生灌木,并有猫头刺 (*Oxytropis aciphylla* Ledeb.)、怪柳 (*Tamarix chinensis* Lour.)等相伴分布,其中,梭梭、花棒、白刺及沙冬青盖度为 30%~35%,猫头刺、怪柳盖度不足 20%。周边地市有 200 多家高耗能的电石、合金、焦炭企业,这些企业规模小、工艺落后,环境污染问题相当突出,上述区域的污染物随风而下在沙漠内部沉积^[5]。

1.2 样品采集测试

在研究区内以流动沙丘为对照处理,选取梭梭、花棒、白刺、沙冬、猫头刺多年生天然灌木林覆盖的固定半固定沙丘为试验处理,随机设置 3 块 5 m×5 m 样地,每一样地选取 3 株灌木并于主根附近挖剖面采集土样(各沙丘间相距 300~500 m 不等),剖面规格为 40 cm×20 cm×100 cm,采样深度为 0~10、10~20、

20~30、30~40、40~60、60~80、80~100 cm,每层采样 0.5 kg 左右并装入自封袋编号^[5],共采集样品 378 份。将土样带回实验室阴干,过 2 mm 土壤筛去除根系等杂物,经盐酸-双氧水(HCL-H₂O₂)消煮后,使用马尔文 2000 激光粒度仪(马尔文,英国)测定土壤粒径并按美国制粒径分级标准及统计学参数计算要求分别输出结果^[5,20-21]。另取土壤样品过 0.149 mm 土壤筛,去除植物根系等杂物后采用王水-高氯酸(HNO₃-HCl-HClO₄)开放式消煮后测定重金属含量^[5,22],Cu、Cr、Mn、Ni、Zn 含量使用原子吸收分光光度计测定(TAS-990,德国),As、Pb、Cd 含量使用原子荧光光谱仪测定(EDX-700HS,日本),每个样品重复测定 3 次。分析测试所用试剂均为优级纯,所有样品分析过程中以国家一级标准物质土壤[GBW(E)-070009]进行质量控制,并按比例采取随机检查和异常点检查进行严格的样品质量监控,确保测试结果符合监控要求。

1.3 土壤粒径参数

1.3.1 统计学参数 平均粒径(M_z)、分选系数(σ)、偏度(Sk)、峰态(K_G)共同组成粒径的统计学参数(无量纲),反映土壤粒径分布的基础特性^[12,20-21],计算公式分别为:

$$M_z = \frac{\sum_i^n R_i f_i}{100} \tag{1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n (R_i - M_z)^2 f_i}{100}} \tag{2}$$

$$Sk = \sqrt{\frac{\sum_i^n (R_i - M_z)^3 f_i}{100}} \tag{3}$$

$$K_G = \sqrt{\frac{\sum_i^n (R_i - M_z)^4 f_i}{100}} \tag{4}$$

式中: R_i 为两相邻粒级 R_{i-1} 及 R_{i+1} 的平均值,mm; f_i 为落在第 i 个粒级的颗粒体积分数,%。表 1 为统计学参数的分级标准^[23]。

表 1 粒径统计学参数分级标准
Table 1 Grading criteria for particle size statistical parameters

分选系数(σ)		偏度(Sk)		峰态(K_G)	
数值	分选级别	数值	偏度级别	数值	峰态级别
<0.35	极好	<-1.50	极负偏	<0.72	极尖窄
0.35~0.50	好	-1.50~-0.33	负偏	0.72~1.03	很尖窄
0.50~1.00	中等	-0.33~0.33	近对称	1.03~1.42	中等
1.00~2.00	较差	0.33~1.50	正偏	1.42~2.75	宽平
2.00~4.00	差	>1.50	极正偏	2.75~4.50	很宽平
>4.00	极差			>4.50	极宽平

1.3.2 单重分形维数 单重分形维数反映粒径的整体粗细状况,数值越大细颗粒含量越高,反之亦然^[10],计算公式为:

$$\left(\frac{R_{i'}}{R_{\max}}\right)^{3-D} = \frac{V_{(r<R_{i'})}}{V_T} \tag{5}$$

式中: D 为单重分形维数; $R_{i'}$ 为第 i' 粒级的土壤粒径,

mm; $R_{\max}$ 为粒级最大值, mm; r 为土壤粒径, mm; $V_{(r < R_i)}$ 为粒径 $< R_i$ 的颗粒的累积体积分数, %; V_T 为各粒级颗粒体积分数之和, %。

1.3.3 多重分形维数 多重分形维数(D_q)反映更细致的粒径分布特征, 计算方法^[3,5,8]为:

当 $q \neq 1$ 时,

$$D_q = \frac{\lim_{\eta \rightarrow 0} \frac{\lg \left[\sum_{i''=1}^{N(\eta)} p_{i''}(\eta)^q \right]}{\lg \eta}}{q-1} \quad (6)$$

当 $q=1$ 时,

$$D_q = \lim_{\eta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i''=1}^{N(\eta)} p_{i''}(\eta) \lg p_{i''}(\eta)}{\lg \eta} \quad (7)$$

式中: q 取 $[-10, 10]$ 的整数, 本文只研究 q 为 0、1 时的特殊情形, 即为容量维数(D_0)及信息维数(D_1); $\eta = 5 \times 2^{-k}$ 为划分马尔文粒度仪机测粒径范围 $[0.02, 2\ 000]$ 的尺寸; $N(\eta) = 2^k$ 为划分出的等距区间, k 为 $[1, 6]$ 的整数; i'' 为 $N(\eta)$ 的个数; $p_{i''}(\eta)$ 为第 i'' 个区间 $N(\eta)$ 的粒径分布概率密度, %^[5]。 D_0 、 D_1 、 D_1/D_0 分别体现粒径分布范围、不均匀程度、离散程度, D_0 值越大粒径分布范围越宽, D_1 值越大粒径分布越不均匀,

D_1/D_0 值越大粒径分布离散程度越小, 且越靠近数值 1 粗颗粒占比越高^[3,5,8]。

1.4 重金属污染评价方法

污染因子(P_I)、地累积指数(I_{geo})、改进的内梅罗指数(N_I)是评价土壤重金属污染的常用方法^[24-28]。

污染因子(无量纲)的算法为:

$$P_I = \frac{c_I}{s_I} \quad (8)$$

式中: c_I 、 s_I 分别为风沙土中重金属 I 的实测值和参考值, mg/kg^[26]。

地累积指数(无量纲)的算法为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{c_I}{1.5b_I} \quad (9)$$

式中: b_I 为风沙土中重金属 I 的背景值, mg/kg, 取值与 s_I 一致^[27]。

改进的内梅罗指数(无量纲)计算方法为:

$$N_I = \sqrt{\frac{I_{\text{geo avg}}^2 + I_{\text{geo max}}^2}{2}} \quad (10)$$

式中: $I_{\text{geo avg}}$ 和 $I_{\text{geo max}}$ 分别为公式(9)计算的地累积指数平均值和最大值。表 2 为污染因子、地累积指数、改进的内梅罗指数的分级标准^[27-28]。

表 2 重金属污染评价分级标准

Table 2 Grading criteria for heavy metal contamination assessment

污染因子(P_I)		地累积指数(I_{geo})		改进的内梅罗指数(N_I)	
数值	污染等级	数值	污染等级	数值	污染等级
(~, 1]	无污染	(~, 0]	无污染	(~, 0.7]	无污染
(1.0~2.0]	轻污染	(0~1.00]	无污染至中污染	(0.7~1.0]	尚清洁
(2.0~3.0]	中污染	(1.00~2.00]	中污染	(1.0~2.0]	轻污染
(3, ~]	重污染	(2.00~3.00]	中污染至重污染	(2.0~3.0]	中污染
		(3.00~4.00]	重污染	(3, ~]	重污染
		(4.00~5.00]	重污染至极重污染		
		(5, ~]	极重污染		

1.5 数据处理

在 SPSS 22 软件中完成单因素方差分析(ANOVA)、最小显著性差异(LSD)等数据统计及斯皮尔曼相关性分析(0.05 显著水平), 在 Canoco 4.5 中利用冗余分析(RDA)筛选影响 HMC 的主要 PSD 参数并明确其贡献, 在 RStudio 4.4.2 软件中利用结构方程模型(SEM)明确筛选出的 PSD 参数对 HMC 的作用, 在 Origin 2025 软件中绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤粒度分布变化

2.1.1 统计学参数变化 由图 1 可知, 流动沙丘及不同天然灌木林下风沙土平均粒径(M_z)、分选系数(σ)、偏度(Sk)、峰态(K_G)均随土层深度增加明显波

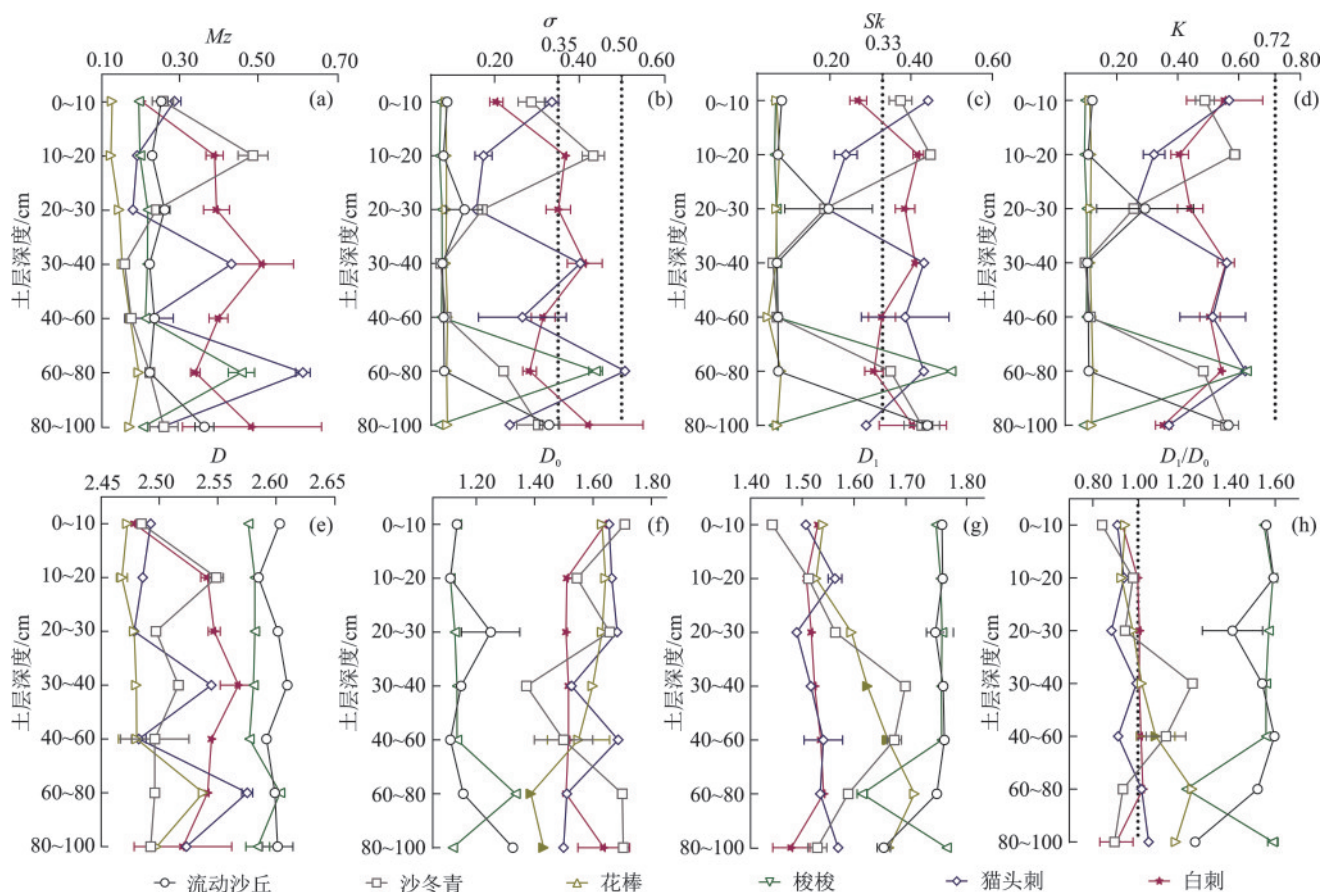
动。平行对比各处理, 整体而言流动沙丘风沙土 σ 、 Sk 、 K_G 最小而 M_z 排第 3 位次, 白刺灌木林下风沙土 M_z 显著增加($p < 0.5$), 而花棒灌木林则相反($p < 0.05$)。 σ 分布在 0.07~0.51, 以 $\sigma < 0.35$ 分选极好的颗粒为主, $0.35 < \sigma < 0.50$ 分选好的颗粒次之。 Sk 随土层加深明显波动, 均为正偏及以下偏度等级且以近对称等级为主。相比于流动沙丘, 天然灌木林虽使 K_G 增大值却未改变峰态等级, 各处理 K_G 仍均为极尖窄峰态级别。

2.1.2 分形维数变化 由图 1 可知, 风沙土单重分形维数(D)的值域较窄, 数值集中且波动较小, 表明颗粒分布整体均匀, 其中尤以流动沙丘最为典型。 D 值排序为流动沙丘 > 梭梭 > 白刺 > 猫头刺 > 沙冬青 >

花棒,表明灌木林下风沙土粗颗粒含量增加,而增幅随土层加深明显波动,其中白刺及猫头刺灌木林 D 值波动最为突出,梭梭林下 D 值最为稳定。

对于风沙土容量维数(D_0),灌木林高于流动沙丘,表明灌木林具有增加风沙土粒径分布范围的作用,且沙冬青、花棒林的作用最为明显($p<0.5$)。各处理下风沙土信息维数(D_1)表现出与 D_0 相反的排

序,流动沙丘高于灌木林,表明灌木林下风沙土粒径分布均匀程度降低,且在沙冬青、花棒林下的降低效果最明显($p<0.5$)。 D_1/D_0 排序及其随土层的变化与 D_1 相似,相比于流动沙丘,灌木林下风沙土粒径分布的离散程度增大,其中沙冬青、花棒林下的增幅最明显($p<0.5$)。除梭梭林外,其余天然灌木林下风沙土 D_1/D_0 散布在1附近,表明土壤中粗颗粒占比较高。



注:图a~图d中的虚线为表1中的粒径参数分级标准;图h中的虚线为数值1,越接近虚线则土壤中粗颗粒占比越高。

图1 流动沙丘及不同天然灌木林下风沙土粒径分布统计学参数及分形维数变化

Fig.1 Variations in particle size statistical parameters and fractal dimensions of aeolian sandy soil under mobile dunes and different natural shrublands

2.2 重金属污染变化

天然灌木林下风沙土重金属污染随土层深度的增加较为复杂,总体而言污染因子(P_I)、地累积指数(I_{geo})、改进的内梅罗指数(N_I)均小于流动沙丘(图2),且各评价指标反映出的污染等级略有差异。由图2可知,绝大多数 P_{Mn} 、 P_{Cu} 、 P_{Cr} 、 P_{Zn} 、 P_{Ni} 、 P_{As} 、 P_{Pb} 小于2,属轻污染及以下级别(表2),而 P_{Cd} 值较高(图2d),属重污染等级。 I_{geo} Cd值为0.23~0.30(图2l),表明Cd属无污染至中污染等级。除 I_{geo} Cu、 I_{geo} Cr、 I_{geo} Zn个别值高于0,略显污染外,绝大多数总金属的 I_{geo} 值小于0,属无污染等级。绝大多数 N_I 值为0.7~2.0,表明风沙土存在轻微重金属污染。

2.3 粒度变化对重金属污染的影响

因 P_I 计算方式相对其余2种评价指标简单,可较直接反映重金属污染程度,遂作为代表性指标与粒度参数构建斯皮尔曼相关关系矩阵(图3)。由图3可知, P_I 与粒度参数的相关关系紧密且复杂,尤其是在对粒径分布影响较为明显的沙冬青及花棒林下,因此,采用冗余分析(RDA)进一步辨别明显影响 P_I 的粒度参数(图4)。坐标轴分别解释17.14%和6.29%的重金属污染变化, D 、 M_z 、 K_G 是显著影响风沙土重金属污染的粒度参数($p<0.05$,表3)。为更清晰地量化 D 、 M_z 、 K_G 对重金属污染的影响,在 I_{geo} 及 N_I 这2个综合评价重金属污染的参数中选取更为典型的后者并采用结构方程模型(SEM)体现(图5a)。SEM卡

沙堆发育,被拦截的粗颗粒逐渐聚集并滚落至沙堆基部^[35-36];当沙堆发育至稳定阶段,蠕移粗颗粒难以翻越或穿透沙堆,故更多地汇聚在沙堆基部^[37]。4)灌木林所处的沙丘部位差异,以及不同季节的灌木林,也会改变其对风沙土粒径的作用。例如,灌木林覆盖下风沙土在沙丘坡顶最细,背风坡最粗^[32],是由风在背风坡汇聚导致风力增大而形成粗颗粒迅速沉降所导致的^[38-39]。而冬季灌木林下的风沙土粗颗粒含量高于春季,可能与春季冬季研究区域风速较秋季高,植被对细颗粒物拦截作用下降有关,也被相似研究^[32]证实。

3.2 风沙土粒度变化对重金属污染的作用

虽然植物根系对风沙中的土重金属有一定吸收作用^[19],但风沙土特性如颗粒大小、PSD等将明显影响重金属分布、积聚、迁移运动、活性等,且作用更为直接^[4-5,18]。总体而言,重金属更易积聚于比表面积大且有效吸附效果明显的细颗粒,从而活性降低^[40-41]。例如,粒径 $<63\mu\text{m}$ 的细砂对重金属具有更强的黏结力,有助于重金属向颗粒表面运动从而产生有效吸附^[25]。奇瓦瓦沙漠沙尘暴释放的黏土颗粒吸附携带大量的Sr、Ca、Mg等碱性重金属,且随沙尘暴污染整个墨西哥西北地区及部分美国地区^[25,42]。上述研究结果进一步强化并提升了本研究的意义,沙漠戈壁虽人迹罕至,但风沙土HMC(图2)及其对周边城市的威胁却不可忽略,研究HMC与风沙土颗粒间的关联颇具价值,且结果与以往研究^[17,25,43]所得一致。

库布齐沙漠中风沙土(沙粒)HMC与PSD呈线性关系^[29,44],然而,该关系因 R^2 过低难以准确量化风沙土粒度变化对HMC的影响,故无法推广应用于本研究区。结构方程模型(SEM)常被用于量化环境变化对响应变量的直接与间接作用,且可直观呈现作用路径及系数^[45]。模型结果显示拟合效果好(图5),HMC减轻是由 M_z 增大进而指数增加 D 及对数增加 K_G 所导致,三者共同作用且间接效果十分明显。但本研究与SUN等^[29]、CORRADINI等^[44]研究结果存在一些差异,表明风沙土PSD变化对HMC的影响机制较为复杂,尽管研究区同为沙漠,但作用关系却并不一致,可能与风沙土自身粒度差异及沙漠中植被种类不同有关。但 M_z 减小有助于土壤吸附固持重金属,减弱重金属活动性,从而减轻HMC的结果与以往研究^[17,25,41,43-44]成果一致。

3.3 不足与展望

以乌兰布和沙漠流动沙丘及不同天然灌木林下风沙土为研究对象,综合运用粒径的统计学参数及分形维数理论明晰PSD规律,选取3种常用参数评价土壤HMC,揭示PSD变化对HMC的影响。然而,研究

仍存在一些不足,主要表现为2点:1)由于取样点在沙漠之中,不论是针对流动沙丘还是灌木林下沙地,风沙土(沙粒)的强流动性导致开挖取样剖面后难以准确分割取样土层。2)应考虑使用APCS-MLR及PMF等模型分析风沙土重金属来源,乌兰布和沙漠位于诸多工业城市的下风向^[5],沙尘携带污染物移动并沉积的现象不可忽略^[25]。因此,今后需研发便于携带且可准确采集不同深度流沙的采样器,并增加取样数量及丰富重金属测定种类以便于确定重金属来源。

4 结论

1)乌兰布和沙漠流动沙丘及不同天然灌木林下的风沙土平均粒径(M_z)、分选系数(σ)、偏度(Sk)、峰态(K_G)均随土层深度增加明显变化。白刺、花棒灌木林下风沙土 M_z 分别显著增大、减小。风沙土 σ 为0.07~0.51,分选程度以极好等级居首,好等级次之; Sk 无极正偏等级且以近对称等级为主; K_G 均为极尖锐峰态级别。

2)天然灌木林降低风沙土单重分形维数 D 值及多重分形维数中的 D_1 值,增大 D_0 值及 D_1/D_0 值,即灌木林提升土壤的粗颗粒比例、粒径分布范围及离散程度,却降低粒径分布均匀程度,其中沙冬青及花棒林的作用效果最明显。

3)整体而言,风沙土重金属污染较轻,不同灌木林对重金属污染的影响并无明显一致规律。灌木林下风沙土重金属污染程度轻于流动沙丘风沙土,但表层土壤(0~10、10~20 cm)的污染程度略高于其余土层。

4)结构方程模型很好地拟合了 M_z 、 D 、 K_G 对改进的内梅罗指数(N_I)的直接及间接作用。风沙土重金属污染降低的直接原因是土壤细颗粒含量、粒径分布峰态的提升及粒径平均值的减小,且二者的提升分别通过指数、对数函数的形式受控于粒径平均值的减小。今后仍需研发便于携带且可准确采集不同深度流沙的采样器,并增加取样数量及丰富重金属测定种类以便于确定重金属来源。

参考文献:

- [1] RICHER-DE-FORGES A C, CHEN S C, HEUVE-LINK G B M, et al. Does digital soil mapping prediction performance of soil texture improve when adding uncertain field texture estimates: A study based on clay content [J]. Geoderma, 2025, 456: e117277.
- [2] PENG G, XIANG N, LV S Q, et al. Fractal characterization of soil particle-size distribution under different land-use patterns in the Yellow River delta wetland in China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14(6): 1116-1122.
- [3] LIU X, ZHANG G C, HEATHMAN G C, et al. Frac-

- tal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China[J]. *Geoderma*, 2009, 154(1/2): 123-130.
- [4] SUN L X, ZHANG Y L, WU B, et al. Impact of particle size separation on the stabilisation efficiency of heavy-metal-contaminated soil: A meta-analysis [J]. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 2024, 26(10): 1821-1835.
- [5] 代豫杰, 郭建英, 董智, 等. 不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征[J]. *环境科学*, 2017, 38(11): 4809-4818.
- DAI Y J, GUO J Y, DONG Z, et al. Spatial distribution of soil particles and heavy metals under different psammophilic shrubs in the ulan buh desert [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(11): 4809-4818.
- [6] HUANG B, YUAN Z J, LI D Q, et al. Effects of soil particle size on the adsorption, distribution, and migration behaviors of heavy metal(loid)s in soil: A review[J]. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 2020, 22(8): 1596-1615.
- [7] KWAK J I, KIM D, AN Y J. Evidence of soil particle-induced ecotoxicity in old abandoned mining area[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 470: e134163.
- [8] MANDELBROT B. How long is the coast of Britain Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. *Science*, 1967, 156(3775): 636-638.
- [9] PAN Y X, CHEN M, CHEN Y D. Analysis of the relationship between soil particle fractal dimension and physicochemical properties[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2025, 84(8): e200.
- [10] GUAN X W, WANG J, LIU G M, et al. Grain size characteristics of surface sediment in the Jilantai Salt Lake Protection System after long-term wind-sand activities[J]. *Land Degradation and Development*, 2024, 35(1): 321-333.
- [11] MIRI A, WEBB N P. The impact of a multiple-row Tamarix windbreak on grain size parameters of aeolian sand flux [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2024, 88(2): 482-497.
- [12] WANG H B, ZUO H J, JIA X P, et al. Full particle size distribution characteristics of land surface sediment and their effect on wind erosion resistance in arid and semiarid regions of northwest China[J]. *Geomorphology*, 2021, 372: e107458.
- [13] 王淮亮, 高君亮, 原伟杰, 等. 戈壁灌丛堆周边地表土壤颗粒的空间异质特征[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(5): 464-473.
- WANG H L, GAO J L, YUAN W J, et al. Spatially heterogeneous characteristics of surface soil particles around nebkhas in the Gobi Desert [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(5): 464-473.
- [14] 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.
- WANG J T, YU M H, YANG H L, et al. Soil erodibility of typical plant communities in Ulan Buh Desert [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(6): 1543-1550.
- [15] LI H N, DANG X H, HAN Y L, et al. Sand-fixing measures improve soil particle distribution and promote soil nutrient accumulation for desert-Yellow River coastal ecotone, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 157: e111239.
- [16] LI H N, MENG Z J, REN X M, et al. Characteristics of soil particle sizes and fractal parameters under different plantation types of *Populus alba* [J]. *Forests*, 2024, 15(4): e632.
- [17] LIU G N, WANG J, LIU X, et al. Partitioning and geochemical fractions of heavy metals from geogenic and anthropogenic sources in various soil particle size fractions [J]. *Geoderma*, 2018, 312: 104-113.
- [18] WANG X P, LI X R, XIAO H L, et al. Evolutionary characteristics of the artificially revegetated shrub ecosystem in the Tengger Desert, northern China [J]. *Ecological Research*, 2006, 21(3): 415-424.
- [19] OGUNDIRAN M B, OSIBANJO O. Heavy metal concentrations in soils and accumulation in plants growing in a deserted slag dumpsite in Nigeria [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2008, 7(17): 3053-3060.
- [20] MCMANUS J. Grain size determination and interpretation [M]//TUCKER M. *Techniques in Sedimentology*. London: Blackwell Scientific Publications, 1988: 63-85.
- [21] FOLK R L, WARD W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1): 3-26.
- [22] 龙加洪, 谭菊, 吴银菊, 等. 土壤重金属含量测定不同消解方法比较研究[J]. *中国环境监测*, 2013, 29(1): 123-126.
- LONG J H, TAN J, WU Y J, et al. A comparative study on the detection of heavy metal in soil with different digestion methods [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, 29(1): 123-126.
- [23] 肖靖安, 裴亮, 孙莉英, 等. 额济纳旗两种地貌类型戈壁纵剖面沉积物粒度特征[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(3): 38-44.
- XIAO J A, PEI L, SUN L Y, et al. Characteristics of grain sizes of sediments in two typical regions of Ejina Gobi [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3): 38-44.
- [24] HUANG J L, WU Y Y, SUN J X, et al. Health risk assessment of heavy metal(loid)s in park soils of the largest megacity in China by using Monte Carlo simulation coupled with positive matrix factorization model [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 415: e125629.
- [25] YANG Y F, LU X W, YU B, et al. Exploring the environmental risks and seasonal variations of potentially toxic elements (PTEs) in fine road dust in resource-based cities based on Monte Carlo simulation, geo-detector and random forest model [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 473: e134708.

- [26] 魏复盛,陈静生,吴燕玉,等.中国土壤环境背景值研究[J].环境科学,1991,12(4):12-19.
WEI F S, CHEN J S, WU Y Y, et al. Study on the background contents on 61 elements of soils in China[J]. Environmental Science, 1991, 12(4): 12-19.
- [27] 张超,贺峰,王姊煜,等.秦岭典型钼矿区农田土壤和作物重金属污染特征、来源解析及健康风险评估[J].环境科学,2024,45(9):5526-5537.
ZHANG C, HE F, WANG Z Y, et al. Pollution characteristics, source analysis, and health risk assessment of heavy metals in soil and crops in a typical molybdenum mining area of Qinling Mountains[J]. Environmental Science, 2024, 45(9): 5526-5537.
- [28] 赖涓涓,杨德钰,刘亮,等.银川市浅层表土重金属污染特征及源解析[J].中国环境科学,2024,44(8):4496-4506.
LAI J J, YANG D Y, LIU L, et al. Characteristics and source identification of heavy metal pollution in shallow topsoil in Yinchuan City[J]. China Environmental Science, 2024, 44(8): 4496-4506.
- [29] SUN K, WANG H, PEI Z Y, et al. Particle-size fractal dimensions and pore structure characteristics of soils of typical vegetation communities in the Kubuqi Desert[J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 10: e1044224.
- [30] 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.
- [31] ZHANG J M, YU X X, JIA G D, et al. Determination of optimum vegetation type and layout for soil wind erosion control in desertified land in north China[J]. Ecological Engineering, 2021, 171: e106383.
- [32] 金耀涛,田丽慧,张登山,等.高寒沙地地表风沙沉积物粒度特征的时空变化[J].青海农林科技,2024(4):82-90.
JIN Y T, TIAN L H, ZHANG D S, et al. Spatiotemporal variation of particle size characteristics of surface aeolian sediments in Alpine Desert[J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2024(4): 82-90.
- [33] 丁国栋.风沙物理学[M].2版.北京:中国林业出版社,2010.
DING G D. Aeolian physics[M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010.
- [34] 王露.乌兰布和沙漠典型单株灌木防风阻沙效益研究[D].北京:北京林业大学,2019.
WANG L. Study on the benefits of sand and sand resistance of single shrub in Ulan Buh Desert[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [35] 肖佳奇,武胜利,陈鹏鹏.和田河下游灌丛沙堆表层沉积物粒度和分形特征[J].中国沙漠,2024,44(4):24-36.
XIAO J Q, WU S L, CHEN P P. Grain size and fractal characteristics of surface sediments of nebkhas in the lower reaches of Hotan River, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(4): 24-36.
- [36] 高永,丁延龙,汪季,等.不同植物灌丛沙丘表面沉积物粒度变化及其固沙能力[J].农业工程学报,2017,33(22):135-142.
GAO Y, DING Y L, WANG J, et al. Sediments particle size changes and its sand fixation ability for different shrub dunes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(22): 135-142.
- [37] 魏亚娟,党晓宏,蒙仲举,等.吉兰泰盐湖中心盐爪灌丛沙堆形态及其沉积特征[J].水土保持研究,2020,27(3):385-390.
WEI Y J, DANG X H, MENG Z J, et al. Morphological and sedimentary characteristics of dune covered by *Kalidium foliatum* nebkhas in the center of Jilantai salt lake[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3): 385-390.
- [38] 张登山,田丽慧,鲁瑞洁,等.青海湖湖东沙地风沙沉积物的粒度特征[J].干旱区地理,2013,36(2):203-211.
ZHANG D S, TIAN L H, LU R J, et al. Grain-size features of aeolian deposits in the eastern shore of Qinghai Lake[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(2): 203-211.
- [39] 田丽慧,张登山,彭继平,等.高寒沙地人工植被恢复区地表沉积物粒度特征[J].中国沙漠,2015,35(1):32-39.
TIAN L H, ZHANG D S, PENG J P, et al. Grain size of land surface deposits in a vegetation restoration region of the alpine sandy land in Qinghai, China[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(1): 32-39.
- [40] GONG C, MA L, CHENG H, et al. Characterization of the particle size fraction associated heavy metals in tropical arable soils from Hainan Island, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 139: 109-114.
- [41] SULEMANA A, KODUAH M, OWIREDU S, et al. Spatial distribution of potentially toxic elements in e-waste contaminated site at Akwatia-Line, Kumasi, Ghana[J]. Heliyon, 2023, 10(1): e23381.
- [42] PEINADO P. Geochemical characterization of mineral dust sources in the Chihuahuan Desert and southern High Plains regions[D]. El Paso: The University of Texas, 2013.
- [43] LUO X S, YU S, LI X D. Distribution, availability, and sources of trace metals in different particle size fractions of urban soils in Hong Kong: Implications for assessing the risk to human health[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(5): 1317-1326.
- [44] CORRADINI F, MEZA F, CALDERÓN R. Trace element content in soil after a sediment-laden flood in northern Chile[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(10): 2500-2515.
- [45] YANG J, YANG W H, WANG F, et al. Driving factors of soluble organic nitrogen dynamics in paddy soils: Structure equation modeling analysis[J]. Pedosphere, 2020, 30(6): 801-809.