

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.002; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.002.

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, 120.

Li Tianyang, Meng Zhongju, Chen Xiaoyan, 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, 120.

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

李天扬¹, 蒙仲举¹, 陈晓燕², 李浩年¹, 徐志明³

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区社会科学院,
呼和浩特 010010; 3. 鄂尔多斯市腾达勘察设计院有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017010)

摘要: [目的] 通过分析不同混交林模式对库布齐沙漠土壤粒度特征的影响, 为沙地人工林高效、可持续经营提供科学依据。[方法] 选择库布齐沙漠沿黄段具有代表性的 4 种混交林配置模式, 取 0—80 cm 土层深度土样, 采用激光粒度法进行土壤粒度的测定, 并计算土壤平均粒径(Mz)、分选系数(δ)、偏度(SK)、峰度(KG)和分形维数特征等。[结果] (1) 研究区的优势粒径为细砂与中砂。4 种不同植物配置模式对土壤粒径有明显细化作用, 黏粒、粉粒、极细砂含量相较于对照组 CK 分别增加了 141.37%~415.38%, 105.75%~724.73%, 64.93%~1 597.36%。(2) 4 种植被配置模式营建后, 不同深度土层平均粒径均有明显上升, 幅度为 2.44%~20.33%。(3) 比对不同配置模式下土壤的粒度参数后, 发现分形维数的值与峰度值呈正相关, 与平均粒径呈负相关。[结论] 土壤粒径的细化程度与配置模式有关, 不同植物配置模式对土壤粒径细化作用主要集中在表层, 且细化效果随土层深度的增加而逐渐降低。不同深度土层平均粒径均有明显上升, 土壤颗粒的分选等级降低, 颗粒分布变得更加离散; 土壤颗粒分布呈现逐渐趋于宽平; 土壤颗粒向正偏发展; 不同土层深度土壤颗粒分形维数均有显著增加($p < 0.05$)。

关键词: 库布齐沙漠; 不同配置模式; 土壤粒径; 分形维数

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0101-09

Effects of different mixed forest configuration modes on the grain size characteristics of aeolian sandy soil in Kubuqi Desert

Li Tianyang¹, Meng Zhongju¹, Chen Xiaoyan², Li Haonian¹, Xu Zhiming³

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia
Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Academy of Social Science,
Hohhot 010010, China; 3. Ordos Tengda Survey and Design Co., Ordos, Inner Mongolia 017010, China)

Abstract: [Objective] By analyzing the effects of different mixed forest patterns on the soil particle characteristics of the Kubuqi Desert, this study provides scientific basis for the efficient and sustainable management of sandy land forests. [Methods] Four representative mixed-forest configuration patterns along the section of the Yellow River in Kubuqi Desert were selected. Soil samples were taken from 0—80 cm soil depth. The laser particle size method was used for the determination of soil particle size and calculation of the mean soil particle size (Mz), sorting coefficient (δ), skewness (SK), kurtosis (KG), and fractal dimensional characteristics. [Results] (1) The dominant grain sizes in the study area were fine sand and medium sand. The four different vegetation configuration patterns had a significant refining effect on soil grain size, and the content of clay, silt, and very fine sand increased by 141.37%~415.38%, 105.75%~724.73%, and 64.93%~1597.36%, respectively, compared with the control group CK. (2) After the camping of the four

收稿日期: 2023-12-20

修回日期: 2024-03-11

资助项目: 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费(BR22-13-03); 鄂尔多斯市重大科技攻关项目(2022EEDSKJZDZX020-4); 内蒙古自治区科技计划(2022YFHH0076)

第一作者: 李天扬(1998—), 男, 内蒙古巴彦淖尔人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 2764536971@qq.com

通信作者: 蒙仲举(1980—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 教授, 硕导, 主要从事水土保持与荒漠化防治。E-mail: mengzhongju@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

vegetation configuration modes, the average grain size of the soil layer at different depths increased significantly, ranging from 2.44%~20.33%. (3) After comparing the grain size parameters of the soil under different configuration modes, it was found that the value of fractal dimension was positively correlated with the value of kurtosis and negatively correlated with the average grain size. [Conclusion] The degree of soil particle size refinement is related to the configuration mode. Different plant configuration modes on soil particle size refinement are mainly concentrated in the surface layer, and the effect of refinement gradually reduces with the increase of soil layer depth. The average particle size of soil layer at different depths increases significantly, the sorting grade of soil particles decreases, and the particle distribution becomes more discrete. The distribution of soil particles shows a gradual tendency to be broad and flat. The soil particles develop toward positive bias. The fractal dimension of soil particles at different depths of soil layer increases significantly ($p<0.05$).

Keywords: Kubuqi Desert; different configuration modes; soil particle size; fractal dimension

土地荒漠化是当今世界面临最大的社会问题之一,由于沙化土地面积急剧增长,沙化现象日趋严重,生态环境恶化,经济损失严重^[1]。已有的研究表明,在未来气候变暖的情境下,我国潜在荒漠化区域有明显的增加趋势^[2],库布齐沙漠气候干燥、风沙危害严重,是我国荒漠化较为严重的地区之一^[3]。受风力作用的影响,土地荒漠化正以每年 100 km² 的速度推进^[4],因此许多专家学者通过生物措施、工程措施及其组合措施进行防治。研究结果表明生物措施不仅降低了风沙活动、增加土壤的抗蚀能力,还大大提高了土壤的肥力,是荒漠化防治最有效、最持久的措施^[5]。

森林植被的防风固沙效能对土壤粒径分布特征的影响尤为重要,相关研究表明,植物地上部分可有效增加地表粗糙度,一方面增大了土壤颗粒的起动风速,另一方面通过减弱风沙流挟沙能力,促进了风蚀颗粒的沉降,进而使土壤中细颗粒物质和营养成分的含量不断增加,土壤结构得以改良^[6]。现阶段研究者对于库布齐沙漠人工林的研究方向多为单一树种^[7],对土壤粒度的研究多停留到风成沙的粒度参数^[8-9],关于混交林不同树种配置对粒度特征的影响研究较少。

本文以库布齐沙漠沿黄段 4 种混交林植物配置模式为对象,依据美国制(USDA)标准进行划分粒径,通过激光粒度仪对 4 种植物配置模式下不同土层的土壤粒径的土壤平均粒径(Mz)、分选系数(δ)、偏度(SK)、峰度(KG)和分形维数特征等,研究该地区土壤粒径的在 4 种植物配置模式下的变化程度,为沙漠地区土壤粒径物理组成改良方向提供参考。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市库布齐沙漠沿黄段(108°67'E,40°49'N),海拔 1 057~1 071 m。库布

齐沙漠属于温带大陆性气候,风沙活动主要集中在 3—5 月^[10],年大风天数为 25~35 d,平均降水量 245 mm,年平均气温 6.8 °C,年平均蒸发量为 2 720 mm。年平均风速较大,为 3.0 m/s,以西北风、北风和南风为主,春季多风,常常伴随着沙物质,风大沙多是该地气候特征。研究区植被主要以沙生植物为主,如柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙柳(*Salix psammophila*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosus*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、杨柴(*Corethroedendron fruticosum* var. *mongolicum*)、花棒(*Corethroedendron scoparium*)、新疆杨(*Populus alba* var. *pyramidalis*)等等。

1.2 研究内容和方法

研究区防护林营建于 2005 年,现已停止人工灌溉,处于自然生长状态。新疆杨+柠条锦鸡儿混交林(YN)、新疆杨+杨柴混交林(YF)、新疆杨+花棒混交林(YH)、花棒+沙柳混交林(HS),选取周边地形地貌相似裸沙地作为对照。选取样地周围海拔、坡度和高程相似的区域,划定 3 个 10 m×10 m 的植物样方,在每个样方内进行土壤剖面的挖取采用五点取样法将同一土层深度土壤混合,分别采集 0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm 土层深度的土壤样品,共取土壤样品 75 份。表 1 为研究区样地调查表。

粒度预处理和测试在风沙物理与防沙治沙工程重点实验室完成。采用飞驰激光粒度分析仪(FRITSCH, Idar-Oberstein, Germany)进行沙样粒度的测量,其中分散装置采用大容量湿式样品分散装置 Hydro LV,该仪器的测量范围为 0.01~2 000 μ m,精确度高于 0.6%,测量过程中使用超声震荡 10 s 以分散团聚体,每个样品重复测量三次后取平均值,可以很好的完成所需样品的测量工作。在测量前需将土样自然风干,使用电子天平(0.000 1 g)称取 0.80 g 土样,放入规格为

250 ml 的烧杯中,加入体积分数为 10% 的双氧水 10 ml,以去除土样中的有机质,之后放在加热板上加热,温度调至 100 ℃,等样品中的有机质完全去除,即烧杯内不再冒泡即可,加热过程中可适当继续补加双氧水,直至反应完全。再继续加入 10 ml 体积分数为 10% 的稀盐酸,以去除样品中的碳酸钙物质,直至烧杯

中不再冒泡即可。将烧杯中注满蒸馏水,静置 24 h 后,将上清液倒掉,重新注满蒸馏水静置,如此反复直至溶液呈中性。倒掉上清液后加入 0.05 mol/L 的六偏磷酸钠溶液 10 ml,作为分散剂以降低颗粒凝聚性,然后放在 TS-3112 摇瓶机上震荡 5 min,使分散剂充分发挥作用,消除样品胶结作用。

表 1 样地调查基本情况

Table 1 Basic information of sample site investigation

配置模式	植被密度	主要林下草本植被	植被覆盖度/%	地表状况	沙丘类型
YN	0.35±0.44	虫实 (<i>Corispermum hyssopifolium</i>)、沙蒿 (<i>Artemisia desertorum</i>)、雾冰藜 (<i>Grubovia dasyphylla</i>)	>65	以物理结皮为主,无流沙	固定流沙
YY	0.62±0.47	虫实 (<i>Corispermum hyssopifolium</i>)、沙蒿 (<i>Artemisia desertorum</i>)、狗尾草 (<i>Setaria viridis</i>)	>50	物理结皮约 30%,流沙面积约 20%	
YH	0.52±0.32	虫实 (<i>Corispermum hyssopifolium</i>)、沙蒿 (<i>Artemisia desertorum</i>)	<40	少量物理结皮,流沙面积约 35%	
HS	0.15±0.13	虫实 (<i>Corispermum hyssopifolium</i>)、沙蒿 (<i>Artemisia desertorum</i>)、沙蓬 (<i>Agriophyllum squarrosum</i>)	<15	少量物理结皮,流沙面积约占 50%	半固定流沙
CK	—	沙蓬 (<i>Agriophyllum squarrosum</i>)	<5	—	流动沙丘

注:式中 HS、YH、YN、YY 和 CK 分别代表花棒+沙柳混交林、新疆杨+花棒混交林、新疆杨+柠条锦鸡儿混交林、新疆杨+杨柴混交林和裸沙对照组,下同。

1.3 土壤粒度参数模型

粒径依据美国制 (USDA) 标准进行划分:砾石 (>2 000 μm)、极粗沙(1 000~2 000 μm)、粗沙(500~1 000 μm)、中沙(250~500 μm)、细沙(100~250 μm)、极细沙(50~100 μm)、粉粒(2~50 μm)和黏粒(<2 μm)^[11]。

测量结果采用 Krumbein 等^[12]算法进行对数转化,把粒径值转变成 Φ 值,后根据 Folk-Ward^[13]提出的图解法公式计算粒度参数,平均粒径(Mz)指土壤颗粒粗细的平均状况,值越大颗粒越细,值越小颗粒越粗^[14]。分选系数(δ)表示土壤颗粒分布的离散程度,其值越大表明颗粒分布越离散,分选性越差。偏度(SK)衡量了粒度分布的对称性,进而表明了中值粒径与平均粒径的相对位置关系。峰度(KG)表示粒度分布的中部和尾部的展形之比,是土壤颗粒粒度分布在平均粒度两侧集中程度的参数,峰度值越大,峰态越尖窄,样品的粒度分布越集中,同时也表明至少有一些沉积物颗粒没有经过环境的影响而直接进入环境中^[15]。并根据粒度参数分级标准(表)探讨气流中沙物质的粒度参数特征及沙粒运动形式。计算公式如下:

$$\Phi = -\log_2 d \tag{1}$$

$$Mz = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3} \tag{2}$$

$$\sigma = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6} \tag{3}$$

$$KG = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44 \times \Phi_{75} - \Phi_{25}} \tag{4}$$

$$SK = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2 \times \Phi_{50}}{2 \times (\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2 \times \Phi_{50}}{2 \times (\Phi_{95} - \Phi_5)} \tag{5}$$

式中:d 为土壤颗粒直径(mm);Φ₅, Φ₁₆, Φ₂₅, Φ₅₀,

Φ₇₅, Φ₈₄ 和 Φ₉₅ 分别为粒度累积曲线上百分含量为 5, 16, 25, 50, 75, 84, 95 所对应的 Φ 值。

1.4 统计分析

采用 Excel 2007, Origin 9.1 软件进行数据整理、计算分析、图表绘制,由 SPSS 27.0 软件对数据进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)、并采用 LSD 多重检验。

2 结果与分析

2.1 不同配置模式下的土壤粒径分布

由表 2 可知,研究区土壤粒径主要以细砂和中砂为主。在 4 种不同植物配置的影响下,0—80 cm 土层深度 0~100 μm 土壤颗粒含量相较 CK 显著增加 (p<0.05),其中 0—80 cm 土层深度黏粒含量相对对照组 CK 增加了 141.37%~415.38%;0—80 cm 土层深度粉粒含量相对对照组 CK 增加了 105.75%~724.73%;0—80 cm 土层深度极细砂含量相对对照组 CK 增加了 64.93%~1 597.36%。在 4 种不同植物配置的影响下,0—80 cm 土层深度土壤中砂含量显著降低 (p<0.05),对照组 CK 下降了 18.73%~24.75%。对土壤粉粒而言,4 种不同植物配置模式相较对照组 CK 能显著增加土壤粉粒含量 (p<0.05)。说明 4 种不同植物配置模式对沙漠细颗粒有明显拦截作用,土壤粒径的细化程度与配置模式有关。

4 种不同植物配置模式下土壤粗砂含量随土层深度加深表现为先上升后降低,细砂和粉砂含量逐渐增加,说明不同植物配置模式所拦截的沙漠细颗粒主要集中于地下 10—60 cm,且细化效果随土层深度的增加而逐渐降低。

表 2 不同配置模式下土壤粒径组成

Table 2 Composition of soil particle size under different configuration modes

		μm						
深度/cm	配置模式	黏粒	粉粒	极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂
0—10	HS	0.51±0.05D	1.70±0.12D	0.63±0.03D	69.62±0.75B	26.53±0.84B	0.17±0.16B	0.83±0.40CD
	YH	1.08±0.06A	6.74±0.12A	3.74±0.17B	59.43±2.30D	26.27±1.63B	1.03±0.26B	1.70±0.29BC
	YN	0.76±0.03C	5.77±0.31B	6.07±0.28A	47.75±1.06E	12.78±0.88D	1.31±1.42A	7.46±1.05A
	YY	0.89±0.10B	2.91±0.19B	3.02±0.29A	71.93±0.68E	20.03±0.75D	0.42±0.50A	0.77±0.09A
	CK	0.26±0.05E	0.93±0.03E	0.38±0.01D	64.46±1.05C	31.51±0.57A	0.53±0.09B	1.85±0.32B
10—20	HS	0.63±0.06C	1.49±0.07C	0.88±0.25C	72.79±2.86A	22.78±2.45B	0.43±0.31B	1.11±0.50CD
	YH	0.75±0.07BC	1.75±0.14B	1.72±0.20B	65.41±2.53B	21.69±1.72B	5.77±1.32A	2.90±0.13A
	YN	0.92±0.06A	2.78±0.10A	3.41±0.20A	66.91±2.68B	18.55±2.18C	4.99±2.71A	2.39±1.18AB
	YY	0.78±0.21AB	1.82±0.05A	1.51±0.36A	72.07±0.23B	21.75±0.53C	0.68±0.17A	1.35±0.12AB
	CK	0.33±0.12D	0.99±0.05D	0.43±0.04D	59.07±0.38C	36.67±0.21A	0.52±0.12B	1.94±0.11ABC
20—40	HS	0.69±0.03C	1.47±0.06C	1.13±0.20B	75.99±0.84A	19.09±1.10C	0.36±0.27B	1.19±0.30B
	YH	0.74±0.11BC	1.71±0.08B	1.56±0.31B	67.18±3.87B	24.28±1.71B	2.34±1.67A	2.11±0.51A
	YN	1.01±0.02A	2.00±0.06B	3.61±0.45A	76.97±3.79A	14.33±2.94D	0.96±0.94AB	1.07±0.30B
	YY	0.83±0.06B	1.77±0.02B	1.41±0.28A	72.31±2.51A	22.21±2.82D	0.34±0.16AB	1.06±0.15B
	CK	0.38±0.01D	1.39±0.10C	0.57±0.06C	60.88±0.23C	33.95±0.32A	0.80±0.23AB	1.96±0.10A
40—60	HS	0.41±0.04B	1.62±0.03B	0.50±0.01E	67.07±1.19D	29.37±0.86B	0.24±0.15BC	0.80±0.29BC
	YH	0.69±0.06A	1.71±0.07AB	1.33±0.01C	79.42±0.16A	16.44±0.10E	0.01±0.01C	0.39±0.23C
	YN	0.67±0.09A	1.82±0.08B	1.62±0.01A	73.76±0.17C	20.88±0.25C	0.28±0.06AB	0.93±0.28AB
	YY	0.66±0.09A	1.67±0.11B	1.46±0.03A	77.26±0.71C	18.52±0.31C	0.32±0.14AB	0.36±0.22AB
	CK	0.29±0.03C	1.19±0.03C	0.77±0.05D	62.77±0.31E	33.28±0.32A	0.35±0.23A	1.32±0.10A
60—80	HS	0.46±0.03C	1.40±0.04B	0.68±0.01E	67.90±0.61D	28.10±1.01B	0.30±0.18AB	1.08±0.36A
	YH	0.68±0.82B	1.68±0.09A	1.26±0.04C	79.32±0.20C	17.01±0.27C	0.06±0.03AB	0.03±0.04B
	YN	0.87±0.11A	1.75±0.11A	4.40±0.09A	85.77±0.14A	7.10±0.18E	0.11±0.06B	0.09±0.16B
	YY	0.75±0.11AB	1.68±0.12A	2.16±0.06A	82.51±0.14A	12.48±0.49E	0.27±0.12B	0.35±0.15B
	CK	0.26±0.05D	1.21±0.06C	0.87±0.06D	63.79±0.49 E	31.85±0.64A	0.64±0.43A	1.35±0.27A

注：大写字母为不同混交林配置模式在同一土层深度的差异显著($p<0.05$)。

2.2 不同配置模式下土壤的粒度参数

由图 1A 可知,对照组 CK 的平均粒径在不同土层深度介于 2.01~2.11 μm ,不同配置模式的营建下,不同深度土层平均粒径均有明显上升,幅度为 2.44%~20.33%。配置模式 YN 相对对照组 CK 的平均粒径提升最大,在不同深度土层的平均粒径在 1.74~2.53 μm 。4 种不同植物配置对于不同土层的平均粒径有增加作用,这与上文所得的不同植物配置模式对沙漠细颗粒有明显拦截作用相符。

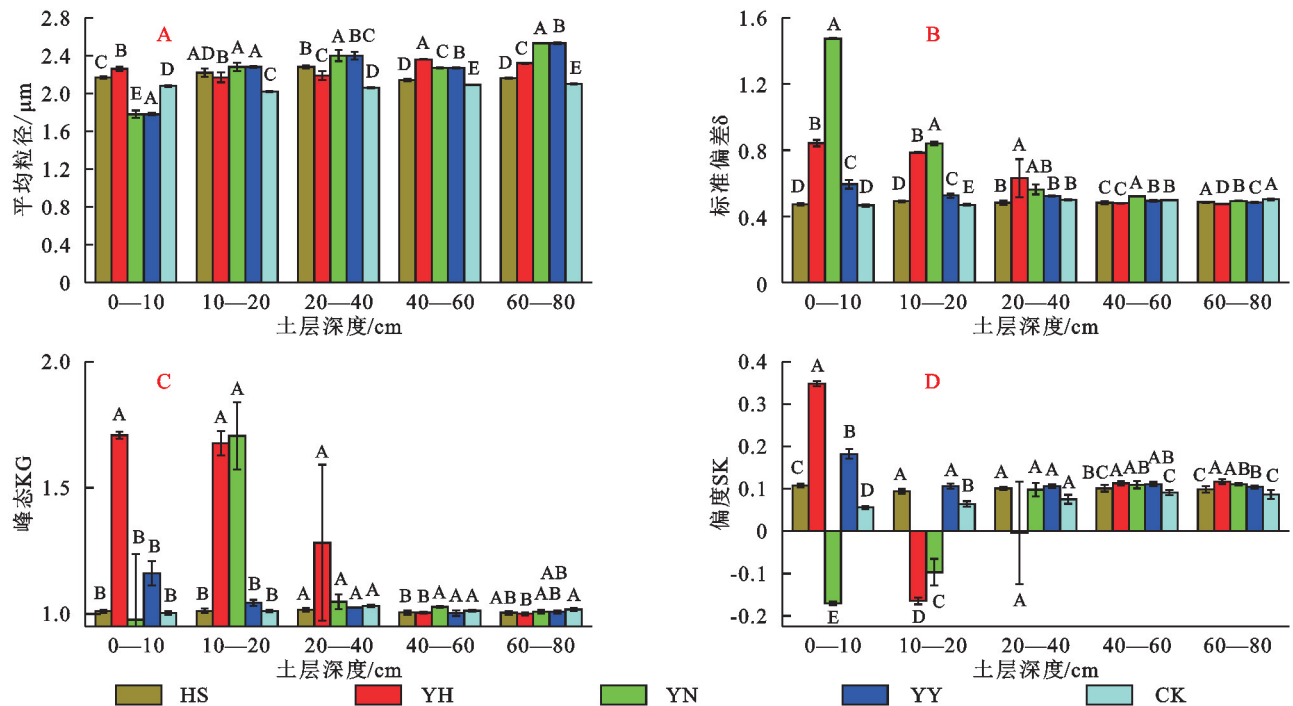
由图 1B 可知,对照组 CK 的风选系数在不同土层深度介于 0.46~0.50 μm ,土壤颗粒的分选性很好。在不同植被配置模式建立后,不同土层深度土壤颗粒的分选系数介于 0.47~1.47 μm ,土壤颗粒的分选等级降低。在 4 种植被配置模式的影响下,不同土层土壤颗粒的分选系数相较于对照组 CK 均有不同程度的增长。配置模式 YN 在 0—20 cm 土层的分选系数变化最为明显,这可能与配置模式 YN 对风沙的拦截作用更为明显所致,沙粒径逐渐增大,起沙风速随之增大^[16],植被对地表风速的拦截作用促进了土壤颗粒的沉积,从而影响了 0—20 cm 土层的分选系数,使其变化明显。

由图 1C 可知,对照组 CK 土壤颗粒的峰度值属于

中等。在混交林建立后,土壤颗粒的峰度随着土层深度的增加而向宽平发展。在 0—80 cm 土层深度下,配置模式 HS 的颗粒峰度值属于中等;配置模式 YH 的颗粒峰度值由很尖窄到中等;配置模式 YN 的颗粒峰度值由很尖窄到中等;配置模式 YY 的颗粒峰度值由尖窄到中等;4 种植物配置模式与对照组 CK 相比,土壤颗粒峰态的值在不同土层深度内逐渐趋于宽平。

由图 1D 可知,对照组 CK 土壤颗粒的偏度属于近对称。在混交林建立后,增加了地表沙物质的拦截作用,使地表大粒径沙物质增多,改变了土壤颗粒的偏态,粒度分布随着土层深度增加而趋于近对称。

由表 3 可知,配置模式 YN 在各土层土壤颗粒分形维数均最大,分别为 2.25,2.18,2.17,2.10,2.14;对照组 CK 在各层土壤颗粒分形维数均最小,分别为 1.94,1.94,2.00,1.95,1.95;4 种不同植物配置模式在整体上均表现为随土层深度的增加,分形维数逐渐减小。4 种不同植物配置与对照组 CK 对比不同土层深度土壤颗粒分形维数均有显著增加($p<0.05$),0—80 cm 土层深度分形维数相比对照组 CK 增加 3.24%~15.75%。说明 4 种不同植物配置模式对土壤颗粒分形维数均有增加作用。



注:大写字母为不同混交林配置模式在同一土层深度的差异显著($p < 0.05$)。

图 1 粒度参数图

Fig. 1 Particle size parameter diagram

表 3 不同土层深度土壤颗粒分形维数

Table 3 Fractal dimension of soil particles at different soil depths

配置模式	土层深度/cm				
	0—10	10—20	20—40	40—60	60—80
HS	2.05±0.02C	2.08±0.01B	2.09±0.01C	2.02±0.01B	2.03±0.01C
YH	2.24±0.01A	2.12±0.03AB	2.11±0.03BC	2.10±0.02A	2.09±0.02B
YN	2.25±0.01A	2.18±0.01A	2.17±0.01A	2.10±0.02A	2.14±0.03A
YY	2.16±0.03B	2.13±0.01AB	2.13±0.01B	2.09±0.03A	2.11±0.03AB
CK	1.95±0.05D	1.95±0.08C	2.00±0.02D	1.95±0.01C	1.95±0.01D

注:大写字母为不同混交林配置模式在同一土层深度的差异显著($p < 0.05$)。

2.3 分形维数与各粒度参数关系

分别以 4 种植被配置模式 0—80 cm 不同采样点的粒度参数制作分形维数与粒度参数关系散点图,可直观地观察 4 种植被配置模式各土层粒度参数的分布情况。由图 2 可看出 YH 和 YN 同 HS, YY 和对照组 CK 的粒度参数存在明显界限,各粒度参数散点图均能对其进行明显的区分,HS 和 YY 间各粒度参数差异不大,在平均粒径—分形维数、标准偏差—分形维数和偏度—分形维数散点图可进行明显识别,其他散点图均无法严格区分。从粒度参数散点图中可以看出 YN 各粒度参数分布范围最大, YH 次之,其次为 HS, YY, 对照组 CK 分布最集中。说明配置模式 YN 对于土壤的粒度参数影响最大,但影响并不稳定,重复组土壤颗粒的平均粒径变得离散。配置模式 YN 和 YH 下土壤颗粒的分选系数变大,分选性变差。配置模式 HS 和 YY 在平均粒径变大的同时,分选系数的增长小、分布集中。

由平均粒径—分形维数散点图可知,分形维数的值与平均粒径呈负相关。4 种植被配置模式中 YH, YN, YY 的平均粒径与分形维数呈显著差异性($p < 0.05$)。在土壤颗粒的分形维数增长的同时,其分选性也在变差、偏度向正偏或负偏变化、粒度分布也越集中。

2.4 不同植物配置模式土壤颗粒频率分布曲线

土壤颗粒频率分布曲线常用于分析颗粒大小分布情况。分别以 HS, YH, YN 和 YY 等 4 种植物配置与对照组 CK 5 种样地的 0—80 cm 土层深度土壤颗粒平均值制作颗粒频率分布曲线,可以看出 5 种样地的土壤粒径分布存在差异,其中 YN 与 HS 的差异最为明显,且随着土层深度的增加,5 种样地土壤粒径分布的差异在逐渐减小,均表现为双峰型。5 种样地的第一次波峰均出现在 200 μm 附近,第二次波峰均出现在 1 000 μm 附近,随着土层深度的增加,土壤粒径 $> 500 \mu\text{m}$ 的体积百分含量呈负相关。

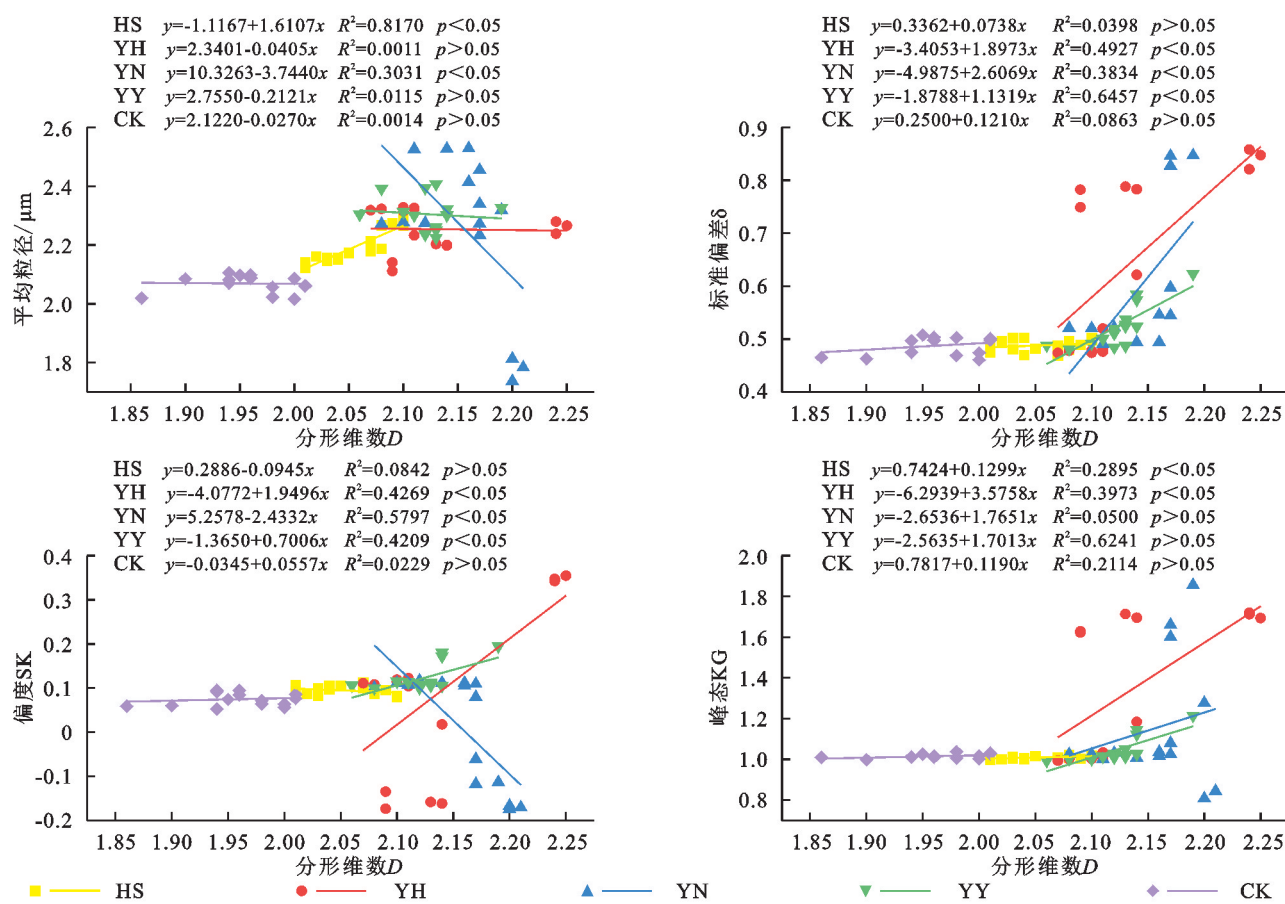


图 2 粒度参数散点图

Fig. 2 Scatter diagram of particle size distribution

累积频率分布曲线可以反映土壤颗粒的分布情况,一般曲线越陡峻,颗粒分布越均匀。分析 5 种样地表层土壤的累积频率分布曲线可知,4 种植物配置模式累积分布曲线开始时变化较缓慢,但约在 $100\ \mu\text{m}$ 后开始变陡,并迅速升高,在接近 $250\ \mu\text{m}$ 时趋于平缓,说明颗粒多集中在 $100\sim 250\ \mu\text{m}$ 范围内;4 种植物配置模式相较于对照组 CK,曲线随土层深度增加而越陡峻,颗粒分布也越均匀(图 3)。

3 讨论

土壤是由各种形状、大小不一的固体组分及有一定排序的孔隙链接组成的多孔介质,不同的组分及孔隙的组合影响着土壤的物理性质^[17-20]。本研究所得土壤不同深度土壤粒径与桂洪杰^[21]认为库布齐沙漠以细砂为主、其次是中砂,黏粒的含量最小一致。

土壤粒径是描述土壤颗粒的大小及均匀程度^[22]。土壤粒径分布是指土壤中各粒级所占百分比,与土壤结构、土壤肥力及水分有着密切的关系,同时也可以间接反映土壤的侵蚀程度^[23-26]。本研究表明库布齐沙漠沿黄段 4 种不同植物配置模式下土壤粒径含量均发生显著变化($p < 0.05$)。其中中砂、粗砂含量明显降低,细砂和粉砂含量均有不同程度增加,说明不同植物配置模式

对土壤粒径具有细化作用。4 种不同植物配置模式下土壤粗砂含量随土层深度加深表现为先上升后降低,细砂和粉砂含量逐渐增加,说明不同植物配置模式对土壤粒径细化作用主要集中于 $10\sim 60\ \text{cm}$,且细化效果随土层深度的增加而逐渐降低。

土壤颗粒分形维数是反映土壤孔隙结构、土壤肥力状况、透水性和退化程度的指标^[27-29],同时,不同的土地利用模式和不同的植被类型,说明了植物与土壤的交互作用,揭示土壤环境恢复的有效措施等方面^[30-31]。与传统的土壤粒径分布分析法相比,分形维数不仅能反映不同粒径分布的综合特征,更是一个能描述土壤非规则性和复杂结构的量度^[32]。土壤不同粒级的颗粒含量形成不同的质地类型,导致土壤颗粒分形维数及土壤理化性质的改变^[33]。由表 2 可知,4 种不同植物配置与对照组 CK 对比不同土层深度土壤颗粒分形维数均有显著增加($p < 0.05$)。说明 4 种不同植物配置模式对土壤颗粒分形维数均有增加作用。在研究中发现,在不同植被配置模式下,随土层的加深,平均粒径也随之增加,但分形维数的值却在逐渐减小,在比对数据后发现,在 4 种植被配置模式下,不同土层深度土壤粒径中细砂的增长数值最多,黏粒、粉粒、极细砂等粒径小于 $100\ \mu\text{m}$ 的土壤颗粒

含量虽相较于对照组 CK 有显著的增长,但不同植被配置模式中的黏粒、粉粒、极细砂含量是随着土层深

度的增加而减少,这与杜丹丹等在吉兰泰盐湖盆地流域的研究结果一致^[34]。

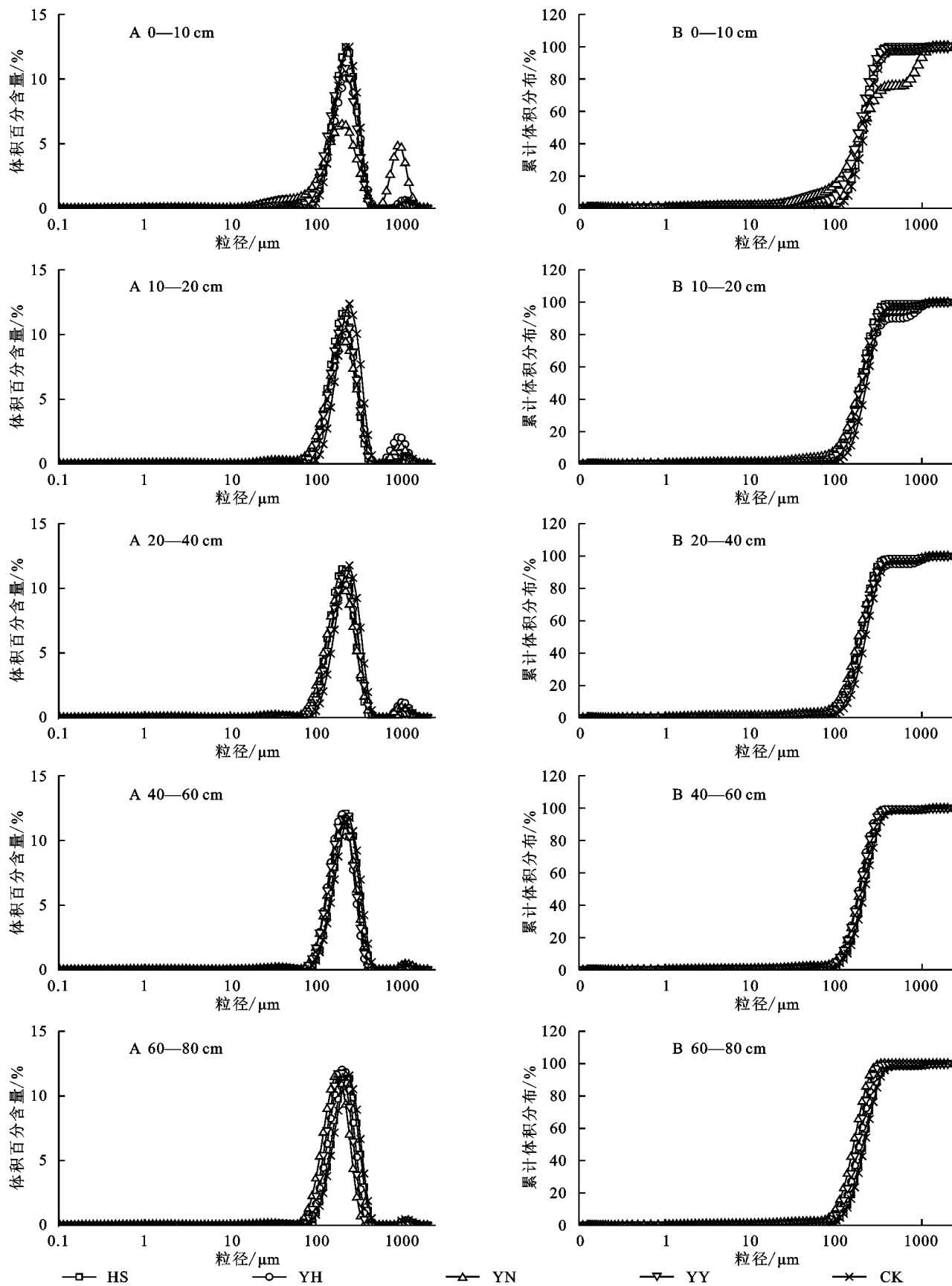


图 3 土壤颗粒频率分布曲线

Fig. 3 The particle size distribution curves

4 结论

(1) 对照组 CK 区域土壤优势粒径为细砂, 4 种不同植物配置模式对土壤粒径有明显细化作用, 且主要集中于表层。细化效果随土层深度的增加而逐渐降低。在 4 种不同植物配置的影响下, 土层深度土壤中黏粒、粉粒、极细砂含量显著上升 ($p < 0.05$), 黏粒、粉粒、极细砂粒径组成相较于对照组 CK 均有明显上升, 上升幅度为 141%~415%, 106%~725%, 65%~1 597%。

(2) 4 种不同植物配置对于不同土层的平均粒径有增加作用, 这与上文所得的不同植物配置模式对土壤粒径有明显细化作用相符。在 4 种不同植物配置模式影响下, 土层深度的平均粒径与对照组 CK 相比显著增加 ($p < 0.05$), 平均粒径相比对照组 CK 增加 5.44%~20.33%。由于 4 种植被配置模式对地表风沙的拦截作用, 使地表土壤颗粒的分布变得离散, 分选性变差, 分选系数随土层增加而逐渐减小。4 种植物配置模式与对照组 CK 相比, 土壤颗粒峰态的值在 0—80 cm 土层深度内也呈现逐渐趋于宽平。在混交林建立后, 改变了土壤颗粒的偏态, 促进了土壤颗粒向正偏发展。

(3) 4 种不同植物配置模式对土壤颗粒分形维数均有增加作用。4 种不同植物配置模式在整体上均表现为随土层深度的增加而减小。4 种不同植物配置与对照组 CK 对比不同土层深度土壤颗粒分形维数均有显著增加 ($p < 0.05$), 0—80 cm 土层深度分形维数为 2.02~2.25。其中, 配置模式 YN 的土壤分形维数增长最显著。

(4) 土壤分形维数显著影响了粒度参数, 土壤分形维数的变化与粒度参数特征的变化之间存在显著关系, 且受到配置模式的影响。其中, 配置模式 YH 和 YN 对粒度参数特征的影响最为显著。

参考文献 (References):

- [1] 王涛, 赵哈林, 肖洪浪. 中国沙漠化研究的进展[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 299-311.
Wang T, Zhao H L, Xiao H L. Advances in desertification research of China[J]. Journal of Desert Research, 1999, 19(4): 299-311.
- [2] 慈龙骏, 杨晓晖, 陈仲新. 未来气候变化对中国荒漠化的潜在影响[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 287-294.
Ci L J, Yang X H, Chen Z X. The potential impacts of climate change scenarios on desertification in China[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 287-294.
- [3] 吕荣, 刘朝霞, 张俊义. 鄂尔多斯地区土地荒漠化防治对策[J]. 中国沙漠, 2002, 22(5): 513-515.
Lu R, Liu Z X, Zhang J Y. Land desertification controlling countermeasures in Ordos Region[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(5): 513-515.
- [4] 米志英. 库布齐沙漠沙柳培育关键技术研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
Mi Z Y. Research on the Key Techniques of *Salix psammophila* cultivation in the Hobq desert[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009.
- [5] 贾瑞庭. 沙区光伏电站不同植被恢复措施对土壤理化性质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
Jia R T. Influence of different vegetation restoration measures of Pv power station in sandy area on soil physical and chemical properties[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [6] Niu X, Gao P, Wang B, et al. Fractal characteristics of soil retention curve and particle size distribution with different vegetation types in mountain areas of Northern China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(12): 15379-15389.
- [7] 王涛. 库布齐沙漠不同林龄沙柳林根际土壤性状研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
Wang T. Research on rhizosphere soil properties of *salix psammophila* forests in Hobq desert[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [8] 刘倩倩, 杨小平. 毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度参数的空间变化及其成因[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 158-168.
Liu Q Q, Yang X P. Spatial variations of grain size parameters of dune sands in the Mu Us Sandy Land and Hobq Sand Sea, Northern China and its potential causes[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 158-168.
- [9] 王文彪, 马俊杰. 库布齐沙漠不同地表类型沙粒粒径分析[J]. 内蒙古林业科技, 2011, 37(3): 27-30.
Wang W B, Ma J J. Analysis on particle size of different land surface types in kubuqi desert[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2011, 37(3): 27-30.
- [10] 郭彩赞, 韩致文, 钟帅, 等. 库布齐沙漠新材料沙障的风速廓线特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 260-265.
Guo C Y, Han Z W, Zhong S, et al. Wind profile characteristics of new materials sand-barriers in hobq desert[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 260-265.
- [11] 李天杰. 土壤地理学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2004.
Li T J. Pedogeography[M]. 3rd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [12] 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 Edition. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010.
- [13] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar [Texas]: a study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.
- [14] 陈新闾. 乌兰布和沙漠黄河沿岸磴口段风积沙运移过程与规律[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2016.
Chen X C. The migration process of aeolian sand in Ulanbuh

- desert along the bank of the Yellow River, Deng Kou [D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2016.
- [15] 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.
- [16] 伊力哈木·伊马木,李菊艳,玉米提·吾提库尔,等.起沙风速的观测方式及其影响因素研究综述[J].中国水土保持,2021(5):42-44.
Yilihamu Yimamu, Li J Y, Yumiti Wutikuer, et al. Review on observation methods and influencing factors of the threshold wind velocity[J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(5):42-44.
- [17] 黄冠华,詹卫华.土壤颗粒的分形特征及其应用[J].土壤学报,2002,39(4):490-497.
Huang G H, Zhan W H. Fractal property of soil particle size distribution and its application[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002,39(4):490-497.
- [18] Bird N R A, Perrier E, Rieu M. The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions[J]. European Journal of Soil Science, 2000,51(1):55-63.
- [19] Millán H, González-Posada M, Aguilar M, et al. On the fractal scaling of soil data. Particle-size distributions[J]. Geoderma, 2003,117(1/2):117-128.
- [20] Prosperini N, Perugini D. Particle size distributions of some soils from the Umbria Region (Italy): fractal analysis and numerical modelling[J]. Geoderma, 2008, 145(3/4):185-195.
- [21] 桂洪杰.黄河宁蒙河段四大沙漠粒度和元素特征对比研究[D].兰州:兰州大学,2013.
Gui H J. Comparative Studies on Characteristics of Rain Sizes and Elements of the Four Deserts in Ningxia- Inner Mongolia Section of the Yellow River [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.
- [22] 蒙仲举,王猛,王淮亮,等.基于数字成像技术的风蚀地表颗粒空间异质性[J].干旱区研究,2016,33(6):1270-1277.
Meng Z J, Wang M, Wang H L, et al. Spatial heterogeneity of soil particles on wind erosion surface based on digital imaging technology[J]. Arid Zone Research, 2016,33(6):1270-1277.
- [23] 杜海燕,周智彬,刘凤山,等.绿洲化过程中阿拉尔垦区土壤粒径分形变化特征[J].干旱区研究,2013,30(4): 615-622.
Du H Y, Zhou Z B, Liu F S, et al. Variation of fractal dimension of soil particle size distribution in the Aral reclamation area in oasis development[J]. Arid Zone Research, 2013,30(4):615-622.
- [24] 刘建立,徐绍辉,刘慧.几种土壤累积粒径分布模型的对比研究[J].水科学进展,2003,14(5):588-592.
- Liu J L, Xu S H, Liu H. Investigation of different models to describe soil particle-size distribution data [J]. Advances in Water Science, 2003,14(5):588-592.
- [25] Nadeu E, de Vente J, Martínez-Mena M, et al. Exploring particle size distribution and organic carbon pools mobilized by different erosion processes at the catchment scale[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(4):667-678.
- [26] 王燕,斯庆毕力格,贾旭,等.基于多重分形的半干旱区弃耕农田土壤粒径分布特征[J].干旱区研究,2018,35 (4):804-812.
Wang Y, String Bilge, Jia X, et al. Particle size distribution of soil in abandoned farmland in semiarid area based on multifractal[J]. Arid Zone Research, 2018,35(4):804-812.
- [27] 张佳瑞,王金满,祝宇成,等.分形理论在土壤学应用中的研究进展[J].土壤通报,2017,48(1):221-228.
Zhang J R, Wang J M, Zhu Y C, et al. Application of fractal theory on pedology: a review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017,48(1):221-228.
- [28] 王贤,张洪江,程金花,等.重庆四面山几种林地土壤颗粒分形特征及其影响因素[J].水土保持学报,2011,25 (3):154-159.
Wang X, Zhang H J, Cheng J H, et al. Fractal characteristics and related affecting factors of particle size distribution of different forest soil in Simian Mountains, Chongqing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011,25(3):154-159.
- [29] 贾萌萌,张忠良,雷加强,等.塔里木沙漠公路防护林地土壤粒径分布的分形特征[J].干旱区研究,2015,32 (4):674-679.
Jia M M, Zhang Z L, Lei J Q, et al. Fractal characteristics of soil particle size distribution in protection forest of Tarim Desert highway[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(4):674-679.
- [30] 赵光辉,苏芳莉,李海福,等.辽河干流上游流域土地利用对土壤颗粒分形维数影响[J].中国沙漠,2016,36 (6):1622-1627.
Zhao G H, Su F L, Li H F, et al. Effects of land use on fractal dimension of soil particles in the upper reaches of the Liaohe River watershed [J]. Journal of Desert Research, 2016,36(6):1622-1627.
- [31] 热依拉·木民,玉米提·哈力克,塔依尔江·艾山,等.基于分形维数的不同林龄新疆杨对土壤理化特性的影响分析[J].土壤通报,2018,49(2):313-319.
Reyila Mumin, Umut Halik, Tayierjiang Aishan, et al. Influence of Different Aged *Populus alba* var. *pyramidalis* on Soil physicochemical properties based on fractal dimension[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(2):313-319.

- Zhang Y F, Li S J, Wang K Q, et al. Physicochemical properties and multi-indicator clustering of soils in typical rocky desertification vegetation restoration area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2): 287-293.
- [22] 蒋嘉瑜,刘任涛,张安宁.干旱与半干旱荒漠草原区柠条灌丛土壤分形维数与理化性质对比分析[J].水土保持研究, 2021, 28(4): 54-61, 69.
- Jiang J Y, Liu R T, Zhang A N. Comparative analysis of soil fractal dimension and soil physical and chemical properties between *Caragana korshinskii* shrub plantations in arid and Semi-arid Desert steppe[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 54-61, 69.
- [23] 李兴民,车克钧,杨永红,等.白龙江上游不同海拔森林土壤养分变化规律研究[J].甘肃农业大学学报, 2014, 49(6): 131-137.
- Li X M, Che K J, Yang Y H, et al. Variation pattern of soil nutrients in forests at different altitudes at upstream of Bailongjiang River[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2014, 49(6): 131-137.
- [24] 卞莹莹,张志敏,付镇,等.荒漠草原区不同植被恢复模式土壤微生物菌落分布特征及其与土壤理化性质的相关性[J].草地学报, 2021, 29(4): 655-663.
- Bian Y Y, Zhang Z M, Fu Z, et al. Distribution characteristics of soil microbial communities of different vegetation restoration models and their correlation with soil physical and chemical properties in desert steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(4): 655-663.
- [25] Weber O B, Silva M C B, Silva C F, et al. Biological and chemical attributes of soils under forest species in Northeast Brazil[J]. Journal of Forestry Research, 2020, 31(5): 1959-1973.
- [26] 魏强,凌雷,王多锋,等.不同海拔甘肃兴隆山主要森林群落的土壤理化性质[J].西北林学院学报, 2019, 34(4): 26-35.
- Wei Q, Ling L, Wang D F, et al. Soil physicochemical properties of three main forest communities at different altitudes in Xinglong Mountain of Gansu Province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(4): 26-35.
- [27] Liu D, Huang Y M, An S S, et al. Soil physicochemical and microbial characteristics of contrasting land-use types along soil depth gradients[J]. Catena, 2018, 162: 345-353.
- [28] 丰菲,许丽,顾清敏,等.宁东矿区天然植物群落特征及其与土壤理化性质的关系[J].水土保持通报, 2021, 41(6): 48-56.
- Feng F, Xu L, Gu Q M, et al. Characteristics of natural plant community and its relationship with soil physicochemical properties in ningdong mining area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 48-56.
- [29] 胡广德.金塔沙地人工林林下草本植物多样性与土壤性质的关系[D].兰州:兰州大学, 2023.
- Hu G D. Understory Herb Diversity of Artificial Forest in Jinta Sandy Land Relationship with Soil Properties[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [30] 胡亚伟,施政乐,刘畅,等.晋西黄土区刺槐林密度对林下植物多样性及土壤理化性质的影响[J].生态学报, 2023, 42(9): 2072-2080.
- Hu Y W, Shi Z L, Liu C, et al. Effects of stand densities on understory vegetation diversity and soil physicochemical properties of *Robinia pseudoacacia* forest in loess region of western Shanxi Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(9): 2072-2080.

(上接第 109 页)

- [32] 伏耀龙,张兴昌,王金贵.岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J].农业工程学报, 2012, 28(5): 120-125.
- Fu Y L, Zhang X C, Wang J G. Fractal dimension of soil particle-size distribution characteristics in dry valley of upper Minjiang River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 120-125.
- [33] 李红丽,万玲玲,董智,等.沙柳沙障对沙丘土壤颗粒粒径及分形维数的影响[J].土壤通报, 2012, 43(3): 540-545.
- Li H L, Wan L L, Dong Z, et al. Effects of sand barriers of *Salix psammophila* on soil particle size and fractal dimension[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(3): 540-545.
- [34] 杜丹丹,高瑞忠,贾德彬.吉兰泰盐湖盆地土壤颗粒分形特征与空间变异分析[J].水土保持研究, 2023, 30(6): 93-101.
- Du D D, Gao R Z, Jia D B. Analysis of fractal characteristics and spatial variability of soil particles in the Jilantai salt lake basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 93-101.