

王文帆,刘任涛,郭志霞,等.腾格里沙漠东南缘固沙灌丛林土壤理化性质及分形维数[J].中国沙漠,2021,41(1):209-218.

腾格里沙漠东南缘固沙灌丛林土壤 理化性质及分形维数

王文帆^{abc}, 刘任涛^{bc}, 郭志霞^{abc}, 冯永宏^{abc}, 蒋嘉瑜^{bc}

(宁夏大学 a.农学院, b.西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, c.西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750000)

摘要:以腾格里沙漠固沙灌丛林为研究对象,选择大、中、小沙丘的迎风坡、丘顶和背风坡为研究样地,调查不同沙丘微地形土壤理化性质和土壤粒径分布的分形特征,阐明沙丘大小和微地形差异对固沙灌丛林土壤理化性质和土壤分形维数分布的影响规律。结果表明:(1)土壤含水率和全碳含量均表现为背风坡中部显著高于丘顶;土壤容重表现为迎风坡中部、丘顶和背风坡底部显著高于背风坡中部,而迎风坡底部居中;沙丘微地形对土壤pH和电导率均无显著影响。土壤容重表现为大、中沙丘显著高于小沙丘;土壤电导率表现为中、小沙丘显著高于大沙丘;沙丘大小对土壤含水率、pH和全碳分布均无显著影响。(2)土壤粉粒(2—50 μm)含量表现为迎风坡底部>背风坡底部>迎风坡中部>丘顶,而土壤极细砂(50—100 μm)含量表现为背风坡底部显著低于迎风坡中部和丘顶,土壤细砂(100—250 μm)含量表现为丘顶显著高于迎风坡底部和中部。大、中沙丘土壤颗粒组成以土壤粉粒和极细砂为主,而小沙丘则以土壤细砂为主。(3)土壤分形维数介于2.59—2.78,表现为迎风坡底部显著高于背风坡底部,其他3个微地形生境居中,而且大沙丘显著高于中沙丘,而小沙丘居中。(4)粉粒含量越高,土壤电导率和全碳含量越高;极细砂含量越高,土壤电导率越低;砂粒含量越高,全碳含量越低;土壤细砂含量越多,分形维数越大。沙丘大小、微地形对土壤理化性质及分形维数的作用效果存在较大的差异性,需要根据沙丘大小和微地形来开展人工林建设和生态效应评价。

关键词: 腾格里沙漠; 土壤理化性质; 分形维数; 土壤粒径分布

文章编号: 1000-694X(2021)01-209-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00091

中图分类号: S153.6

文献标志码: A

0 引言

在沙漠边缘进行人工林生态建设和植被恢复,是控制沙漠化和改善区域环境的有效措施,也是改造利用沙漠化土地的重要途径^[1]。人工植被和草方格沙障能够有效控制沙漠化的发展,减轻风沙危害和促进局地生境恢复,直接影响土壤的物理性质及养分的输入和输出,改善土壤的肥力状况^[2]。在植被恢复过程中,分析土壤性质演变特征及其改良效应对人工固沙林的可持续经营具有重要价值。开展固沙造林后沙丘生境土壤和植被的研究,已成为沙漠植被对环境长期生态反馈影响研究的重要内容^[3]。目前,关于固沙造林后植被恢复的生态效

应研究,已经引起了生态研究科技工作者的高度关注^[4]。

前人对腾格里沙漠的研究主要在沙丘形态、沙物质沉积、风沙动力、粒度特征等方面^[5]。丛殿阁等^[6]对腾格里沙漠北缘沙丘的地貌形态进行研究发现,沙丘形态主要有新月形沙丘和沙丘链、线性沙丘、纵向沙垄、新月形沙垄、复合型沙丘及沙丘链、金字塔形沙丘及沙丘链。哈斯^[7]研究表明,风力作用下的沙粒在沙丘表面上、下坡运动时,输沙量垂线分布出现明显的变异。这些研究主要在一些重点地区开展。例如,宁文晓等^[8]通过研究巴丹吉林沙漠东南部典型高大沙丘各形态参数的变化规律

收稿日期:2020-07-08; 改回日期:2020-09-03

资助项目:国家自然科学基金项目(41867005,41661054);宁夏青年拔尖人才培养工程项目(2018010)

作者简介:王文帆(1996—),女,宁夏中卫人,硕士研究生,主要从事恢复生态学研究。E-mail: nxuwang@126.com.

通信作者:刘任涛(E-mail: nxuliut2012@126.com)

和彼此之间的依赖关系,发现从沙漠中心到边缘,沙丘数量逐渐减少,沙丘高度逐渐升高,沙丘间距逐渐增大,沙丘呈东北-西南走向;沙丘高度、沙丘间距及距沙漠中心的距离两两之间均呈现显著的线性关系。沙地立地分类评价课题组^[9]在对毛乌素沙地立地质量的综合评价中发现在大中型固定、半固定沙丘间立地类型上生长的白沙蒿生物量为 $6.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 踏郎 $4.32 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 生物产量后者只占前者 62.8%, 而经济价值比前者高出 25.6%。但是, 目前关于灌丛林营造后不同大小沙丘微地形土壤理化性质及分形维数分布的相关生态学系统研究较少。

土壤的发育与地形密切相关^[10]。关于沙丘微地形对土壤理化性质影响的研究集中在风沙活动、粒度特征等方面。李清雪^[11]对青海共和盆地沙丘不同部位中间锦鸡儿人工林的土壤改良效应进行研究, 表明沙丘不同部位中间锦鸡儿人工林的有机质、全氮和全磷均得到明显提高, 尤其是全氮含量的增加幅度较大。在沙丘土壤理化性质的研究中, 土壤粒径分布的分形维数可以用来表征土壤沙化和退化程度^[12-13]。

苏永中等^[12]研究了科尔沁沙地农田沙漠化过程中土壤的粗粒化和养分的贫瘠化特征及分形维数与土壤性状的关系, 发现分形维数能很好地表征农田沙漠化演变中土壤结构和养分状况以及沙漠化的程度, 可作为评价土壤沙漠化演变的一项综合性定量指标。但是, 应用在腾格里沙漠是否可以更好地反映固沙灌丛林营造后土壤沙化和退化的改善程度, 尚未可知。鉴于此, 本研究以腾格里沙漠为研究对象, 通过研究不同大小沙丘微地形土壤理化性质和土壤粒径分布的分形特征, 确定土壤粒径分布与土壤理化性质的关系, 旨在揭示腾格里沙漠人工植被演化过程中不同大小沙丘微地形土壤理化性质及分形维数的分布规律, 对于荒漠人工林建设、生态恢复重建和防沙治沙均具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究样地位于腾格里沙漠东南缘的包兰铁路南部区域 ($36^{\circ}59' - 37^{\circ}43' \text{N}$, $104^{\circ}17' - 105^{\circ}37' \text{E}$), 属草原化荒漠地带, 温带大陆性气候。该区域具有干旱少雨、蒸发强烈、冷热温差大、风大沙多

和气象灾害较多等特点。年均气温 9.2°C , 年降水量 184.1 mm , 降水集中在 7—9 月; 年蒸发量 $2\,300 - 2\,500 \text{ mm}$ 。年均风速 $2.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 主要风向为西北风, 夏季风速最大, 冬季最小。土壤含水量 $2\% - 3\%$ ^[14]。腾格里沙漠不同大小的沙丘镶嵌分布, 而且沙丘微地形起伏较大, 以流动沙丘为主, 其次是半固定沙丘以及固定沙丘; 沙丘形状主要为新月形沙丘链、格状沙丘和复合横向沙丘等, 相对高度为 $10 - 20 \text{ m}$ ^[15-16]。

研究样地为 2013 年扎设草方格后营造的灌丛林。采用麦草扎设方格, 草方格扎设规格为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$; 按 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 和 $1 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ (株距 \times 行距) 分别栽植柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii*) 和花棒 (*Hedysarum scoparium*), 并在草方格内撒播油蒿 (*Artemisia ordosica*) 草籽。每 100 m^2 内生长柠条锦鸡儿 21 株, 平均冠幅 0.93 m , 平均高度 0.76 m , 每 100 m^2 内油蒿和花棒平均密度分别 6 株和 13 株, 平均冠幅分别为 1.13 m 和 1.60 m , 平均高度分别为 0.66 m 和 1.43 m 。主要优势草本植物有蒙古虫实 (*Corispermum mongolicum*)、雾冰藜 (*Bassia dasyphylla*) 和沙蓬 (*Agriophyllum squarrosum*)。其中, 蒙古虫实平均密度为 $40 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均高度为 0.09 m ; 雾冰藜和沙蓬平均密度分别为 $27 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $2 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均高度分别为 0.03 m 和 0.05 m 。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

于 2018 年 8 月在营造 5 年的固沙灌丛林内, 调查不同沙丘的海拔、周长、底面积。依据沙丘底面积, 将沙丘分为大沙丘、中沙丘、小沙丘 3 种沙丘类型^[17] (用 eTrex 209x/309x GPS 仪在卫星定位状态下, 选择航迹测面积测量沙丘的底面积)。每种沙丘均设置 3 个重复, 沙丘间隔为 $200 - 500 \text{ m}$ 。在每个沙丘的迎风坡底部、中部、丘顶和背风坡中部、底部分别布设调查样点, 共获得 5 微地形生境 \times 3 种沙丘类型 \times 3 重复 = 45 样点。

1.2.2 土壤样品采集与分析

在每个调查样点内, 利用 5 点取样法 (每个调查样点随机选取 5 个小样方, 每个样方面积为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$) 采集新鲜原状土样混匀后全部装入自封袋 (取样深度为 $0 - 10 \text{ cm}$, 取样工具为小铁锹), 放置在保温箱中, 带回实验室。然后, 在自然状态下风干, 过 2 mm 土壤筛, 并去除枯枝落叶和肉眼可见根

等杂物,进行相关指标测定,包括土壤 pH、电导率、全碳含量、土壤粒径组成。同时,在每个调查样点用环刀(100 mL)采集新鲜原状土样 1 个,用于土壤容重的测定。另外,利用铝盒采集新鲜原状土样 1 个,用于土壤含水率的测定。利用便携式地温仪(TPJ-21)测定每个调查样点的土壤表层温度(0—15 cm)。

土壤含水率(%)和土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)采用烘干称重法测定。土壤 pH 和电导率($\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)采用 1:5 土水比浸提后,分别使用 PHS-3C 酸度计和便携式电导率仪(雷磁 DDSJ-308F)进行测定。土壤全碳(%)使用元素分析仪(意大利 DK6,UDK140)测定。土壤粒径组成采用 Mastersizer3000 激光衍射粒度分析仪进行测定。根据美国农业部(USDA)制土壤质地分级标准划分土壤质地:极粗砂(1 000—2 000 μm)、粗砂(500—1 000 μm)、中砂(250—500 μm)、细砂(100—250 μm)、极细砂(50—100 μm)、粉粒(2—50 μm)和黏粒(<2 μm)^[18]。采用 Tyler 等^[19]基于土壤粒径体积分数数据导出的分形模型计算分形维数(D),公式为。

$$[V(r < R_i)]/VT = (R_i/RL)^{(3-D)} \quad (1)$$

式中: r 为粒径; R_i 为粒径划分中的第 i 级粒径; $V(r <$

$R_i)$ 为小于粒径 R_i 的土壤颗粒体积; VT 为土壤颗粒总体积; RL 为土壤粒径分级中的最大粒径,本研究中 RL 为 250 μm 。计算中,公式两边同时取对数,通过对数曲线的线性回归拟合方程,求出斜率值,即可得到土壤分形维数(D)。

1.3 数据处理与分析

所有数据采用 SPSS 23.0 软件进行统计分析。采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)、双因素方差分析(Two-Ways ANOVA)方法分析不同数据组间的差异,利用 Duncan 法进行处理间多重比较。采用 Spearman 相关系数分析不同指标间的相关性。显著水平为 $\alpha=0.05$ 。用 Origin 2018 作图。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

由表 1 可知,土壤粉粒、细砂和分形维数既受沙丘大小的影响($P<0.05$),亦受沙丘部位的影响($P<0.05$)。土壤含水率、电导率、全碳和极细砂粒均受到沙丘部位的显著影响($P<0.05$)。土壤容重则仅受沙丘大小和部位共同作用的影响($P<0.05$)。

表 1 沙丘大小和部位对土壤理化性质及分形维数的双因素方差分析

Table 1 Two factor variance analysis of the effect of sand dune size and position on soil physical and chemical properties and fractal dimension

因子	含水率	容重	pH	电导率	全碳	粉粒	极细砂	细砂	分形维数
沙丘大小	1.865	1.907	0.401	1.432	2.371	7.25*	2.025	2.892*	3.217*
沙丘部位	2.886*	1.032	0.412	18.345*	3.218*	18.697*	7.398*	12.856*	10.865*
大小×部位	1.219	2.632*	0.727	0.737	1.352	0.499	1.330	1.089	0.928

* $P<0.05$ 。

2.1.1 土壤含水率和土壤容重

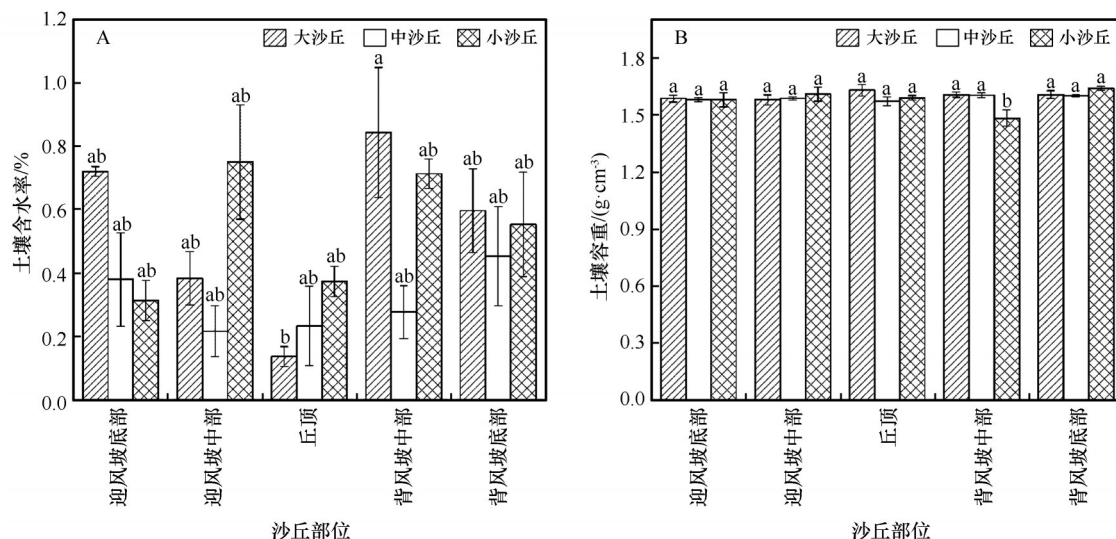
由图 1 可知,在大沙丘,微地形对土壤含水率分布产生显著影响($P<0.05$),而对土壤容重无显著影响($P>0.05$);土壤含水率分布表现为背风坡中部>丘顶。在中沙丘,微地形对土壤含水率和土壤容重均无显著影响($P>0.05$)。在小沙丘,微地形对土壤含水率无显著影响($P>0.05$),而对土壤容重产生显著影响($P<0.05$);土壤容重表现为迎风坡中部、丘顶和背风坡底部显著高于背风坡中部,而迎风坡底部居中。

沙丘大小对土壤含水率分布无显著影响($P>0.05$)。但在背风坡中部,沙丘大小对土壤容重产生

显著影响($P<0.05$),表现为大、中沙丘显著高于小沙丘($P<0.05$);而在其他 4 个微地形中沙丘大小对土壤容重无显著影响($P>0.05$)。

2.1.2 土壤 pH 和电导率

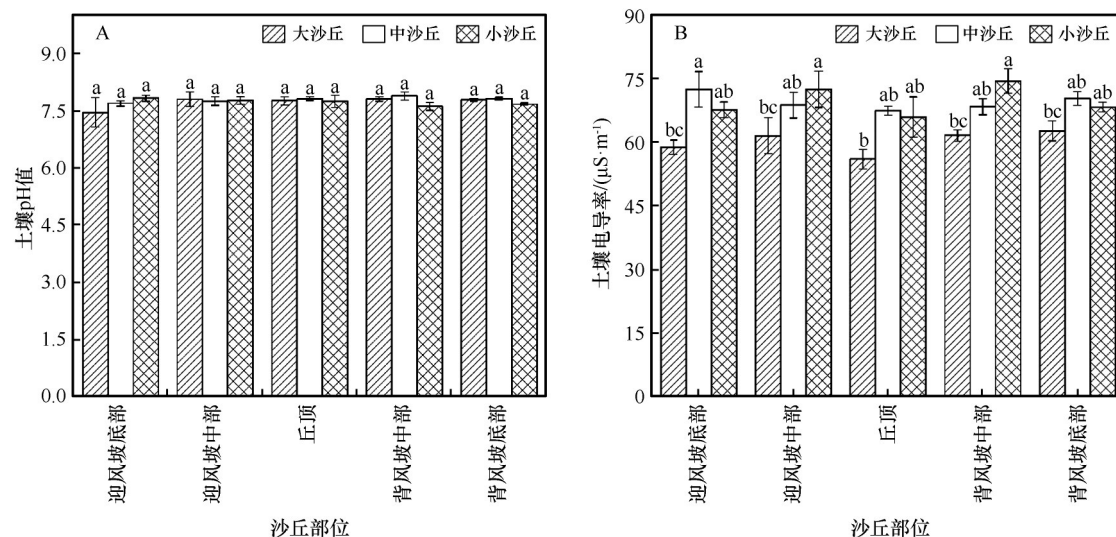
从图 2 可以看出,在大、中沙丘和小沙丘,微地形对土壤 pH 和电导率均无显著影响($P>0.05$)。沙丘大小对 5 个微地形土壤 pH 分布均无显著影响($P>0.05$)。但沙丘大小对微地形土壤电导率产生显著影响($P<0.05$)。在迎风坡底部和中部,沙丘大小对土壤电导率分布均产生显著影响($P<0.05$);在迎风坡底部,土壤电导率表现为大沙丘显著低于中沙丘,但在迎风坡中部表现为大沙丘显著低于小沙



不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图1 不同沙丘微地形土壤含水率和容重的分布

Fig.1 Distribution of soil moisture content and bulk density in micro topography of different dunes



不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图2 不同沙丘微地形土壤pH和电导率的分布

Fig.2 The distribution of soil pH and electrical conductivity in different dune micro topography

丘。在背风坡中部,沙丘大小对土壤电导率分布产生显著影响 ($P < 0.05$),表现为大沙丘显著低于小沙丘。在丘顶和背风坡底部,沙丘大小对土壤电导率分布均无显著影响 ($P > 0.05$)。

2.1.3 土壤全碳

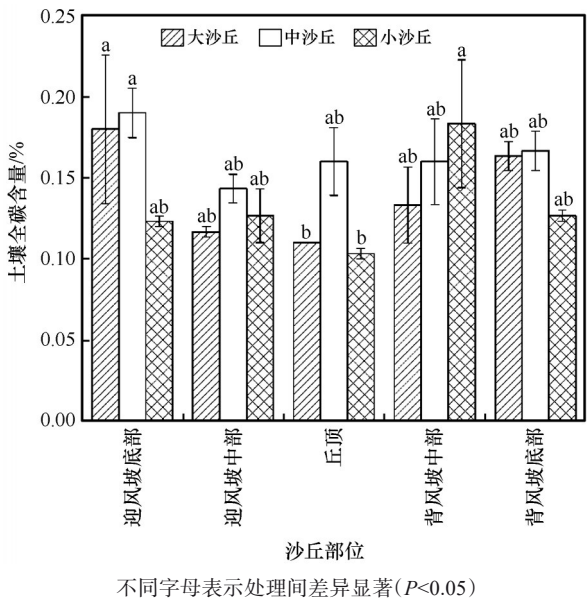
由图3可知,在大沙丘,微地形对土壤全碳分布产生显著影响 ($P < 0.05$),表现为迎风坡底部显著高于丘顶。在中沙丘,微地形对土壤全碳分布无显著影响 ($P > 0.05$)。在小沙丘,微地形对土壤全碳分布产生显著影响 ($P < 0.05$),表现为背风坡中部显著高于丘顶。沙丘大小对5个微地形土壤全碳分布均无

显著影响 ($P > 0.05$)。

2.2 土壤颗粒组成与分形特征

由表2以看出,该研究区无黏粒分布,以砂粒为主,粉粒次之。土壤极细砂 (50—100 μm)、细砂 (100—250 μm) 含量较高,分别为 81.50%—87.79%、9.37%—17.96%,平均值分别为 85.79% 和 12.25%。土壤粉粒 (2—50 μm) 含量最低,平均值为 2.50%。

从表2可以看出,在大沙丘,微地形对土壤粉粒含量分布产生显著影响 ($P < 0.05$),而对土壤极细砂和细砂含量分布均无显著影响 ($P > 0.05$);土壤粉粒



不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)
图 3 不同沙丘微地形土壤全碳的分布
Fig.3 Distribution of soil total carbon in different dune micro topography

表现为丘顶显著低于背风坡中部和底部。在中沙丘,微地形对土壤粉粒和极细砂含量分布均产生显著影响 ($P<0.05$),而对土壤细砂含量分布无显著影响 ($P>0.05$);土壤粉粒表现为迎风坡底部>背风坡底部>迎风坡中部>丘顶,而土壤极细砂含量表现为

背风坡底部显著低于迎风坡中部和丘顶。在小沙丘,微地形对土壤粉粒和极细砂含量均无显著影响 ($P>0.05$),但对土壤细砂含量产生显著影响 ($P<0.05$);土壤细砂表现为丘顶显著高于迎风坡底部和中部。

在迎风坡底部,沙丘大小对土壤粉粒含量产生显著影响 ($P<0.05$),但对土壤极细砂和细砂含量均无显著影响 ($P>0.05$);土壤粉粒含量表现为中沙丘显著高于大沙丘和小沙丘。在迎风坡中部,沙丘大小对土壤粉粒、极细砂含量均无显著影响 ($P>0.05$),但对土壤细砂含量产生显著影响 ($P<0.05$);土壤细砂含量表现为中沙丘显著低于小沙丘。在丘顶,沙丘大小对土壤粉粒含量分布无显著影响 ($P>0.05$),但对土壤极细砂和细砂含量均产生显著影响 ($P<0.05$);土壤极细砂含量表现为小沙丘显著低于大沙丘和中沙丘,但土壤细砂含量表现为小沙丘显著高于大沙丘和中沙丘。在背风坡中部,沙丘大小对粉粒、极细砂和细砂含量均无显著影响 ($P>0.05$)。在背风坡底部,沙丘大小对极细砂和细砂均无显著影响 ($P>0.05$),但对粉粒产生显著影响 ($P<0.05$);土壤粉粒含量表现为中沙丘显著高于大沙丘和小沙丘。

由表 2 可知,研究区土壤分形维数 2.59—2.78。

表 2 不同沙丘微地形土壤粒径分布及其分形维数变化特征
Table 2 Distribution of soil particle size and its fractal dimension in different dune micro topography

沙丘大小	沙丘部位	粉粒 (2—50 μm)	极细砂 (50—100 μm)	细砂 (100—250 μm)	分形维数
大	迎风坡底部	2.32±0.12 ^{bc}	87.56±0.54 ^a	10.13±0.56 ^{bc}	2.78±0.10 ^a
	迎风坡中部	1.53±0.40 ^{bc}	87.79±0.21 ^a	10.68±0.60 ^{bc}	2.72±0.02 ^{ab}
	丘顶	0.72±0.16 ^c	85.74±1.33 ^a	13.53±1.48 ^{bc}	2.76±0.01 ^{ab}
	背风坡中部	2.72±1.07 ^b	87.29±0.97 ^a	9.99±0.33 ^{bc}	2.68±0.04 ^{ab}
	背风坡底部	2.89±1.03 ^b	85.84±0.92 ^{ab}	11.27±0.38 ^{bc}	2.67±0.04 ^{bc}
中	迎风坡底部	5.21±0.63 ^a	84.63±1.28 ^{ab}	10.16±0.70 ^{bc}	2.59±0.02 ^c
	迎风坡中部	2.99±0.59 ^{bc}	87.64±0.60 ^a	9.37±0.13 ^c	2.66±0.02 ^{bc}
	丘顶	2.24±0.39 ^{bc}	86.58±1.09 ^a	11.18±0.86 ^{bc}	2.68±0.02 ^{bc}
	背风坡中部	3.70±1.07 ^{ab}	84.75±0.98 ^{ab}	11.55±1.36 ^{bc}	2.64±0.03 ^{bc}
	背风坡底部	4.89±0.66 ^a	81.97±1.82 ^b	13.13±1.62 ^{bc}	2.60±0.02 ^c
小	迎风坡底部	2.15±0.30 ^{bc}	83.68±1.53 ^{ab}	14.17±1.78 ^b	2.69±0.01 ^{ab}
	迎风坡中部	1.39±0.21 ^c	84.80±1.25 ^{ab}	13.80±1.46 ^b	2.72±0.01 ^{ab}
	丘顶	0.55±0.06 ^c	81.50±1.86 ^b	17.96±1.91 ^a	2.77±0.00 ^{ab}
	背风坡中部	1.98±0.37 ^{bc}	84.72±1.22 ^{ab}	13.30±1.51 ^{bc}	2.70±0.01 ^{ab}
	背风坡底部	2.26±0.31 ^{bc}	84.20±1.94 ^{ab}	13.54±1.76 ^{bc}	2.68±0.01 ^{bc}

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

在大沙丘,微地形对土壤分形维数产生显著影响($P<0.05$),表现为迎风坡底部>背风坡底部。在中沙丘和小沙丘,微地形对土壤分形维数均无显著影响($P>0.05$)。在迎风坡底部,沙丘大小对土壤分形维数产生显著影响($P<0.05$),而在其他4个微地形沙丘大小对分形维数均无显著影响($P>0.05$);土壤分形维数表现为大沙丘显著高于中沙丘。

2.3 土壤理化性质、土壤颗粒组成与分形维数间的相关关系

由表3可以看出,土壤粉粒与土壤全碳、电导率

间呈正相关($P<0.05$),相关系数分别为0.692、0.346,而与含水率、容重、pH之间均无相关性($P>0.05$)。土壤极细砂粒与电导率呈负相关($r=-0.367$; $P<0.05$),而与土壤含水率、容重、pH、全碳含量之间均无相关性($P>0.05$)。土壤细砂与土壤全碳含量间呈负相关($r=-0.305$; $P<0.05$),而与含水率、容重、pH、电导率之间均无相关性($P>0.05$)。

由图4可知,土壤分形维数与土壤粉粒含量之间呈线性负相关($R^2=0.652$, $N=45$, $P<0.01$),而与土壤细砂含量间呈线性正相关($R^2=0.090$, $N=45$, $P<0.05$),但与土壤极细砂含量之间未表现出相关性($P>0.05$)。

表3 土壤颗粒分布与土壤理化性质的相关性

Table 3 Correlation between soil particle distribution and soil physical and chemical properties

土壤颗粒	含水率	容重	pH	电导率	全碳
粉粒(2—50 μm)	-0.047	0.083	0.057	0.346*	0.692**
极细砂(50—100 μm)	-0.099	-0.039	0.137	-0.367*	-0.064
细砂(100—250 μm)	0.210	0.035	-0.125	0.097	-0.305*

* $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。

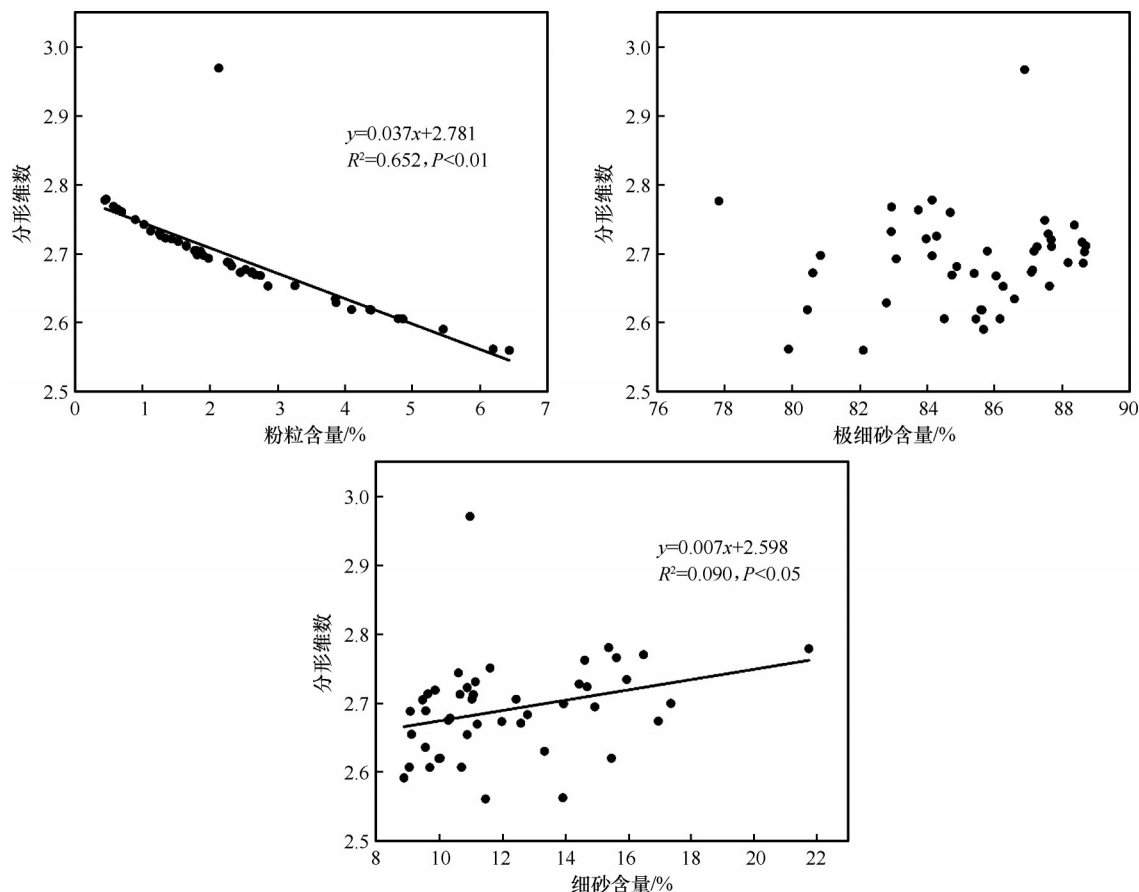


图4 土壤分形维数与各粒级含量的关系(极细砂分图, $P>0.05$)

Fig.4 The relationship between the fractal dimension of soil and the content of each particle.

3 讨论

3.1 沙丘大小、微地形对土壤理化性质的影响

干旱、半干旱区,土壤水分是影响生态系统结构和功能的关键因素,有限的水资源常成为植物生长的关键限制因子^[20]。在腾格里沙漠进行人工植被固沙,流动沙丘表面逐渐固定,由于大气降尘和枯枝落叶累积,地表形成了不同厚度的结皮层,并由无机结皮发育为生长有低等植物及苔藓类植物的生物结皮,从而使沙地持水量增加,截留水分增多^[21]。在大沙丘,土壤含水率分布表现为背风坡中部>丘顶,这与吕贻忠等^[22]在毛乌素沙地得出的结论相似。沙丘表层沙物质的运动,在近地表气流的作用下,迎风坡和丘顶表层干沙向背风坡运动,湿沙层显露且受到光照时间较其他部位时间长,故土壤含水率较低^[23]。同时,沙面植被的蒸腾耗水及土壤表面蒸散导致大沙丘不同微地形表层土壤水分空间变化明显。而在中沙丘和小沙丘,微地形对土壤含水率无显著影响。这与局部地形起伏对气流的阻滞作用有关,也可能是中沙丘和小沙丘相对高差较小,未表现出差异性^[24-25]。沙丘大小对5个微地形土壤含水率无显著影响,可能原因是本研究区为种植5年灌丛,固沙年限较短,对地表保护能力较弱,易受天气或地形等局部外界条件影响,同时,8月为高温期,蒸发强烈,难以形成地表径流,且该区域土壤质地为沙土,持水能力差,入参与蒸发速度快,水分含量低,故不同大小沙丘土壤含水率差异不明显^[26]。

容重是影响沙面紧实度的主要因素,在土壤质地相似条件下,容重反映了土壤的压实程度^[27]。本研究结果显示,大沙丘和中沙丘土壤容重不受微地形的影响,但小沙丘土壤容重表现为迎风坡中部、丘顶和背风坡底部显著高于背风坡中部,而迎风坡底部居中。不同微地形间坡地方位不同,部位不同受到纯净气流(气流速度小于起沙风速时)及风沙流的作用效果不同,导致沙丘表面微立地条件的差异^[23]。在背风坡中部,沙丘大小对土壤容重产生显著影响,表现为大和中沙丘显著高于小沙丘。可能原因是不同沙丘规模、形成时间造成不同大小沙丘容重的差异,这也间接说明大和中沙丘压实程度高于小沙丘,故大和中沙丘土壤容重含量受微地形的影响不明显。

该研究区土壤pH值介于7.4—7.9。沙丘微地

形和沙丘大小对土壤pH均无显著影响,这与李卫红等^[28]在新疆古尔班通古特沙漠的研究结果相似。主要原因是该区域固沙年限短,植被对土壤的改良效果较差,再加上本研究区风大沙多,均可能导致该区域5年的固沙措施对土壤酸碱度的影响较小,但具体原因还有待于进一步研究。本研究结果显示,微地形对土壤电导率亦无显著影响,这与刘任涛等^[29]在科尔沁沙地的研究结果相反。存在差异的原因可能是因为本研究区在腾格里沙漠,且调查时间在夏季,此时降雨量较多,土壤盐分随着水分下渗,使得电导率降低,故土壤电导率受微地形的影响不明显^[30]。在迎风坡底部,土壤电导率表现为大沙丘显著低于中沙丘,但在迎风坡中部和背风坡中部表现为大沙丘显著低于小沙丘。这可能与沙丘不同坡度地形的生境资源以及受干扰程度不同有关,结果导致对不同大小沙丘盐分累积量的影响不同,直接影响不同大小沙丘电导率的分布^[31]。

土壤全碳含量是土壤养分含量的重要指标,其细微变化就可能影响生态系统碳循环^[32]。研究表明,小沙丘和大沙丘的土壤全碳分布表现为丘顶显著低于小沙丘背风坡中部和大沙丘迎风坡底部,而中沙丘无明显差异(图3)。究其原因不同坡位风沙活动存在差异,还可能是风沙流通过丘顶到背风坡底部后,风速降低,使得风蚀影响较小,这还需要对风速和输沙率的进一步研究来证明。微地形对全碳分布在不同大小沙丘表现不同,这可能是不同沙丘形成时间、发育年龄的差异,造成不同沙丘微地形对全碳分布的影响不同。沙丘大小对土壤全碳分布无显著影响,这主要是不同大小沙丘植被类型相同,营造的微生境差异不明显,故沙丘大小对土壤全碳含量差异不明显。

3.2 沙丘大小、微地形对土壤颗粒组成与分形特征的影响

土壤粉粒表现为迎风坡底部>背风坡底部>迎风坡中部>丘顶,而土壤极细砂含量表现为背风坡底部显著低于迎风坡中部和丘顶,土壤细砂表现为丘顶显著高于迎风坡底部和中部(表2)。这种变化规律与俞胜清等^[33]对新疆喀拉库姆沙漠沙丘沉积物粒度变化的研究结果相似。主要原因是不同微地形间沙源沉积物结构、风况的不同,造成土壤粒径组成具有明显差异,同时,由于沙丘形态与气流之间相互作用,风力分选作用在沙丘各部位之间出

现不同程度的差异^[34]。在迎风坡底部和背风坡底部,大沙丘和小沙丘土壤粉粒含量高于中沙丘。在迎风坡中部,小沙丘土壤细砂含量高于中沙丘。在丘顶,大沙丘和中沙丘土壤极细砂含量高于小沙丘,而小沙丘土壤细砂含量高于大沙丘和中沙丘。可能原因是本研究中不同大小沙丘演化时间有所不同,有些沙丘演化历史长,另一些沙丘则形成不久,导致不同大小沙丘沙物质含量存在差异,同时,不同沙丘迁移速度也不同,导致沉积物累积量不同,故不同大小沙丘土壤粒径组成有明显差异^[35]。另外,在沙面上固沙造林后,下垫面结构改变,对近地面风沙流的阻碍作用增加,同时也改变了风沙流的蚀积能力,进而改变了土壤粒径组成^[36]。

已有研究表明,土壤粒径的分形维数可以定量地表征沙漠化过程中土壤粗粒化的演变特征和变化规律,分形维数越低,沙漠化程度越高^[12]。本研究中,土壤分形维数2.59—2.78,表现为迎风坡底部>背风坡底部。这与土壤颗粒组成的变化规律相似。原因是迎风坡不断风蚀形成的前积沙纹在沙丘前移过程中被切割重现,导致在迎风坡上出现粒径的重力分选差异和重叠,迎风坡分选性的重力分异作用和风力分选作用的耦合使土壤粉粒含量在空间部位的分布上变化较大,而且无论沙丘大小,只有迎风坡底部对分形维数有显著影响,表现为大沙丘显著高于中沙丘。地表风沙流结构不同,使得不同大小沙丘迎风坡底部风蚀程度不同,造成的差异也不同。另外,丘顶的砂粒成分较多而粉粒含量较少,因而丘顶的分形维数最小^[37]。这也说明分形维数可以很好地表征土壤颗粒组成^[38]。

3.3 不同大小沙丘微地形土壤理化性质、土壤颗粒组成和分形维数间的相关关系

粉粒含量越高,土壤电导率和全碳含量越高;极细砂含量越高,土壤电导率越低;细砂含量越高,全碳含量越低。可见,土壤颗粒分形维数对土壤电导率和全碳状况的反映程度不同,其中反映程度最大的是土壤全碳,其次是电导率。这可能是因为夏季降雨较多,一年生草本植物相对较多,形成了小型的屏障,减弱了地表风蚀作用,使得土壤中的盐分 and 全碳含量得到保护,从而影响土壤颗粒的分布^[39]。

土壤分形维数与土壤粉粒含量之间存在显著相关关系,且呈线性负相关,这说明土壤分形维数

随着土壤粉粒含量的增加呈降低的趋势。土壤分形维数与土壤极细砂含量之间未表现出相关性,说明土壤分形维数并不是对每个粒级的变化都反映明显^[40]。土壤分形维数与土壤细砂含量间存在相关关系,且呈线性正相关,说明土壤分形维数随着土壤细砂含量的增加呈升高的趋势。土壤细砂含量越多,分形维数越大,表明土壤质地相对较好^[41]。可见土壤颗粒分形维数可以更好地反映固沙灌丛林营造后土壤沙化和退化的改善程度。土壤颗粒分形维数对各个粒级土粒含量的反映程度有一定差异,这可能与成土母质、土壤粒径分布范围、含量及质地均匀程度有关^[42]。

4 结论

沙丘背风坡土壤含水率较高,有利于增加土壤全碳含量,沙丘底部(包括迎风坡和背风坡底部)可以有效增加土壤粉粒含量,且土壤分形维数迎风坡底部要高于背风坡底部,而微地形对土壤pH的影响较小,丘顶和迎风坡中部对土壤颗粒组成的影响较小。

固沙造林后小沙丘土壤容重显著降低,以土壤细砂为主,而中型和小沙丘土壤电导率含量较高,但大型和中型沙丘土壤颗粒组成以土壤粉粒和极细砂为主,而且大沙丘土壤分形维数高于中沙丘。

基于草方格的固沙灌丛林营造后,土壤粒径分布对土壤理化性质影响较大,并且土壤细砂含量越多分形维数越大。这说明分形维数可以很好地反映固沙灌丛林营造后沙丘土壤粒径分布的变化程度。因此,分形维数可以作为评价固沙灌丛林营造后沙丘土壤质地变化的指标。

固沙灌丛林营造后,不同沙丘微地形对土壤理化性质及分形维数的作用效果存在较大的差异性。因此,需要根据沙丘大小和微地形来开展人工林建设和生态效应评价。

参考文献:

- [1] 田青,王建兵,张德罡,等.腾格里沙漠南缘植被恢复过程中土壤理化性状的变化[J].中国沙漠,2013,33(3):772-776.
- [2] Henry N, Le Houerou. Restoration and rehabilitation of arid and semiarid mediterranean ecosystems in North Africa and West Asia: a review[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 2000, 14(1): 3-14.
- [3] 李新荣,张志山,黄磊,等.我国沙区人工植被系统生态-水文过程和互馈机理研究评述[J].科学通报,2013,58(5/6):

- 397-410.
- [4] 李晓兰,相吉山,赵岩,等.科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工林治沙工程效果研究[J].哈尔滨师范大学自然科学学报,2015,31(5):91-95.
- [5] 庞红丽.腾格里沙漠北缘沙丘分布及粒度特征研究[D].北京:中国地质大学(北京),2012.
- [6] 丛殿阁,庞红丽,方苗,等.基于DEM和ETM的腾格里沙漠北缘沙丘形态特征提取[J].中国矿业,2014,23(增刊2):153-159.
- [7] 哈斯.腾格里沙漠东南缘沙丘表面风沙流结构变异的初步研究[J].科学通报,2004,49(11):1099-1104.
- [8] 宁文晓,王振亭.巴丹吉林沙漠东南部典型高大沙丘形态参数分析[J].福建农林大学学报(自然科学版),2018,47(6):755-763.
- [9] 沙地立地分类评价课题组.毛乌素沙地立地质量的综合评价[J].林业科学,1993(5):393-400.
- [10] Chuai X W, Hang X J, Wang W J, et al. Spatial variability of soil organic carbon and related factors in Jiangsu Province, China[J]. Pedosphere, 2012, 22(3):404-414.
- [11] 李清雪.共和盆地沙漠化土地典型人工植被的土壤改良效应[D].北京:中国林业科学研究院,2014.
- [12] 苏永中,赵哈林.科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J].生态学报,2004,24(1):71-74.
- [13] 柳妍妍,胡玉昆,公延明.高寒草原不同退化阶段土壤颗粒分形特征[J].水土保持通报,2013,33(5):138-142.
- [14] 李新荣,张志山,谭会娟,等.我国北方风沙危害区生态重建与恢复:腾格里沙漠土壤水分与植被承载力的探讨[J].中国科学:生命科学,2014,44(3):257-266.
- [15] 吴正.中国沙漠与治理研究50年[J].干旱区研究,2009,26(1):1-7.
- [16] 刘英姿.腾格里沙漠中格状沙丘形态及成因研究[D].西安:陕西师范大学,2013.
- [17] 岳永杰,李钢铁,李清雪,等.浑善达克沙地疏林草地立地条件类型划分[C]//中国治沙暨沙业学会,2008:293-297.
- [18] Su Y Z, Zhao H L, Zhao W Z, et al. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification[J]. Geoderma, 2004, 122(1):43-49.
- [19] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2):362-369.
- [20] Cantón Y, Solé-Benet A, Domingo F. Temporal and spatial patterns of soil moisture in semiarid badlands of SE Spain[J]. Journal of Hydrology, 2004, 285(1/4):199-214.
- [21] 李文龙,李自珍,王刚,等.沙坡头地区人工固沙植物水分利用及其生态位适宜度过程数值模拟分析[J].西北植物学报,2004,24(6):1012-1017.
- [22] 吕贻忠,胡克林,李保国.毛乌素沙地不同沙丘土壤水分的时空变异[J].土壤学报,2006,43(1):152-154.
- [23] 袁立敏. PLA沙障对土壤物理性质影响及其防护效益研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [24] 哈斯.腾格里沙漠东南缘沙丘形态示量特征及其影响因素[J].中国沙漠,1995,15(2):136-142.
- [25] 白晔.巴丹吉林沙漠高大沙山的内部结构及形成过程研究[D].兰州:兰州大学,2011.
- [26] 李森,颜长珍,谢家丽.腾格里沙漠东南缘不同固定程度沙地土壤表层水分时空变化遥感分析[J].中国沙漠,2016,36(3):734-740.
- [27] 贾文茹,李生字,马学喜,等.塔克拉玛干沙漠腹地横向沙丘表面紧实度分异特征[J].干旱区研究,2016,33(3):664-671.
- [28] 李卫红,任天瑞,周智彬,等.新疆古尔班通古特沙漠生物结皮的土壤理化性质分析[J].冰川冻土,2005,27(4):619-626.
- [29] 刘任涛,赵哈林,赵学勇,等.科尔沁沙地流动沙丘掘穴蚁(*Formica cunicularia*)筑丘活动及其对土壤的作用[J].中国沙漠,2010,30(1):135-139.
- [30] 韩跃,马风云,解国磊,等.黄河三角洲盐碱地混交林土壤电导率的空间异质性[J].中国水土保持科学,2014,12(5):84-89.
- [31] 郭志清.我国沙漠地区沙丘的易溶盐含量分布特征[J].中国沙漠,1987,7(4):53-65.
- [32] 张红静.宝日希勒露天煤矿开采对草地土壤理化性质的梯度影响研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [33] 俞胜清,阿布都米基提,周向玲,等.新疆喀拉库姆沙漠新月形沙丘不同部位粒度特征[J].中国沙漠,2013,33(6):1629-1635.
- [34] 哈斯,王贵勇,董光荣.腾格里沙漠东南缘格状沙丘表面气流及其地貌学意义[J].中国沙漠,2000,20(1):31-35.
- [35] 高抒.大型海底、海岸和沙漠沙丘的形态和迁移特征[J].地学前缘,2009,16(6):13-22.
- [36] 申景昕.2种沙障对流沙生境与植被恢复的影响[D].北京:中国林业科学研究院,2018.
- [37] 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.
- [38] 常海涛,刘任涛,刘佳楠,等.草方格造林固沙过程中土壤性质变化及分形特征:以腾格里沙漠东南缘为例[J].水土保持学报,2018,32(6):58-65.
- [39] Su Y Z, Zhao H L. Losses of soil organic carbon and nitrogen and their mechanisms in the desertification process of sandy farmlands in Horqin Sandy Land[J]. Agricultural Sciences in China, 2003(8):70-77.
- [40] 刘阳,陈波,杨新兵,等.冀北山地典型森林土壤颗粒分形特征[J].水土保持学报,2012,26(3):159-163.
- [41] 吕圣桥.黄河三角洲滩地土壤颗粒分形特征及其与土壤性质的相关性研究[D].山东泰安:山东农业大学,2012.
- [42] 夏江宝,张淑勇,王荣荣,等.贝壳堤岛3种植被类型的土壤颗粒分形及水分生态特征[J].生态学报,2013,33(21):7013-7022.

Physical and chemical properties and fractal dimension distribution of soil under shrubs in the southern area of Tengger Desert

Wang Wenfan^{abc}, Liu Rentao^{bc}, Guo Zhixia^{abc}, Feng Yonghong^{abc}, Jiang Jiayu^{bc}

(a. College of Agriculture / b. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China / c. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwestern China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750000, China)

Abstract: Soil physical and chemical properties and fractal dimension distribution characteristics of different dune micro topography after sand fixation and shrub forest construction in Tengger Desert. Taking sand fixing shrub forest in Tengger Desert as the research object, the windward slope, dune crest and leeward slope of large, medium and small sand dunes were selected as the research sample plots. Through investigating the fractal characteristics of soil physical and chemical properties and soil particle size distribution in different sand dune micro topography, the influence of sand dune size and micro topography difference on soil physical and chemical properties and soil fractal dimension distribution of sand fixing shrub forest was clarified. The results showed that: (1) The soil moisture content and total carbon were significantly higher in the middle of leeward slope than in the dune crest; the soil bulk density in the middle of the windward slope, the dune crest and the bottom of the leeward slope is significantly higher than that in the middle of the leeward slope, while the bottom of the windward slope is in the middle; and the micro topography of sand dune had no significant effect on soil pH and electrical conductivity. Moreover, the soil bulk density of large and medium-sized sand dunes is significantly higher than that of small-sized sand dunes; the soil electrical conductivity of medium and small-sized sand dunes is significantly higher than that of large-sized sand dunes; and the size of sand dunes has no significant impact on soil moisture content, pH and total carbon distribution. (2) The content of soil silt (2–50 μm) was as follows: the bottom of windward slope > the bottom of leeward slope > the middle of windward slope > the dune crest, the content of soil very fine sand (50–100 μm) was significantly lower at the bottom of leeward slope than at the middle of windward slope and at the dune crest, the soil fine sand (100–250 μm) is higher at the dune crest than at the bottom of the windward slope and in the middle of the windward slope. Large and medium sand dunes are mainly composed of soil silt and very fine sand, while small sand dunes are mainly composed of soil fine sand. (3) The fractal dimension of soil is between 2.59–2.78, which shows that the bottom of windward slope is significantly higher than the bottom of leeward slope, the other three micro terrain habitats are in the middle, and the large dune is significantly higher than the middle dune, while the small dune is in the middle. (4) Correlation analysis shows that the higher the content of silt, the higher the soil conductivity and total carbon content; the higher the content of very fine sand, the lower the soil conductivity; the higher the content of fine sand, the lower the total carbon content. The more the content of fine sand, the larger the fractal dimension. The results show that the effects of different dune micro topography on soil physical and chemical properties and fractal dimension are different. Therefore, it is necessary to carry out plantation construction and ecological effect evaluation according to the dune size and micro topography.

Key words: Tengger Desert; physical and chemical properties of soil; fractal dimension; soil particle size distribution