

## 民勤白刺灌丛沙堆演替过程中土壤粒径分形特征

马剑平<sup>1</sup>, 王 飞<sup>1,2\*</sup>, 郭树江<sup>1,3</sup>, 纪永福<sup>1,3</sup>, 张莹花<sup>1</sup>, 张裕年<sup>1,2</sup>, 张卫星<sup>1</sup>, 宋达成<sup>1</sup>

(1. 甘肃省治沙研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室(培育基地), 甘肃 武威 733000;  
3. 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 甘肃 民勤 733300)

**摘 要:**通过野外采样与室内分析相结合,研究白刺灌丛沙堆在演替过程中土壤粒度与分形维数特征,分形维数与土壤粒级及土壤理化性质的关系。结果表明:1)民勤不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤均以细砂(46.71%~64.06%)为主;土壤分形维数变化为1.665~2.242,在白刺灌丛沙堆演替过程中分形维数呈现先升高后降低的趋势,衰退阶段达到最大值。2)分形维数与黏粒、粉粒、极细砂呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与中砂呈极显著负相关( $P<0.01$ ),说明黏粉粒、极细砂含量越多,土壤分形维数越高。3)分形维数与有机质、全氮含量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与速效磷含量呈显著正相关( $P<0.05$ ),土壤分形维数可以用来评价土壤的养分状况。研究结果可为荒漠灌丛发挥防风固沙和土壤保育功能的定量化评价提供科学依据。

**关键词:**白刺灌丛沙堆;粒径分布;分形维数;理化性质;民勤

中图分类号:S714.2

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)05-0046-07

## Fractal Characteristics of Soil Particle Size During *Nitraria tangutorum* Shrub Succession in Minqin

MA Jian-ping<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1,2\*</sup>, GUO Shu-jiang<sup>1,3</sup>, JI Yong-fu<sup>1,3</sup>, ZHANG Ying-hua<sup>1</sup>, ZHANG Yu-nian<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Wei-xing<sup>1</sup>, SONG Da-cheng<sup>1</sup>

(1. Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. State Key Laboratory Breeding Base of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Wuwei 733000, Gansu, China;

3. Gansu Minqin National Studies Station for Desert Steppe Ecosystem, Minqin 733300, Gansu, China)

**Abstract:** Through the combination of field sampling and laboratory analysis, the characteristics of soil particle size and fractal dimension during *Nitraria tangutorum* shrub succession were analyzed, and the relationship between fractal dimension and soil particle size and soil physical and chemical properties were studied. The results showed that 1) the soil of *N. tangutorum* shrub in different succession stages was dominated by fine sand (46.71%~64.06%); the soil fractal dimension varied from 1.665 to 2.242, during the succession, the soil fractal dimension firstly increased and then decreased, and reached the maximum in the decline stage. 2) The soil fractal dimension had a very significantly positive correlation with clay, silt and very fine sand ( $P<0.01$ ), and a very significantly negative correlation with medium sand ( $P<0.01$ ), indicating that the more clay, silt and very fine sand contents, the higher the soil fractal dimension. 3) The fractal dimension was significantly and positively correlated with organic matter and total nitrogen content ( $P<0.01$ ), and with available phosphorus content ( $P<0.05$ ). Soil fractal dimension could be used to evaluate soil nutrient status. The results could provide a scientific basis for the quantitative evaluation of

收稿日期:2022-02-12 修回日期:2022-04-26

基金项目:甘肃省青年科技基金计划项目(20JR10RA469);国家青年科学基金项目(31700339);国家自然科学基金(31860116, 31960334, 31760238);甘肃省自然科学基金(20JR5RA096);中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”项目。

第一作者:马剑平,副研究员。研究方向:荒漠生态。E-mail:3000ping@163.com

\* 通信作者:王 飞,助理研究员。研究方向:荒漠化防治。E-mail:zmffei@126.com

desert shrub's functions of wind prevention,sand fixation,and soil conservation.

**Key words:***Nitraria tangutorum* shrub; particle size distribution; fractal dimension; physical and chemical property; Minqin

土壤是植物生长发育的基础物质,土壤粒径分布是重要的土壤物理参数,能够反映土壤风化成土、退化过程及侵蚀程度<sup>[1]</sup>,与土壤水分<sup>[2]</sup>、结构<sup>[3-4]</sup>、肥力状况<sup>[5-6]</sup>关系密切,进一步影响着土壤水分、养分截留与转运、植被生产力和生态恢复过程<sup>[7-8]</sup>。土壤是由不同大小、形状的固体颗粒物构成的多孔介质,具有分形特征<sup>[9]</sup>。B. B. Mandelbort et al<sup>[10]</sup>提出分形理论,随着分形理论的发展,该理论在土壤学研究中得到广泛应用。相关研究表明<sup>[11-13]</sup>,分形维数能够反映土壤物理性质,海拔、植物群落、土壤 pH、水分等因素与土壤粒径分布有关。

灌丛沙堆的发育过程是植被与荒漠环境相互作用的过程<sup>[14]</sup>,是我国干旱荒漠区特有地貌类型,在民勤绿洲-荒漠过渡带分布广泛。白刺(*Nitraria tangutorum*)是超旱生植物,耐风沙、抗盐碱,具有超强的适应能力,由于其易分枝、耐沙埋、枝条沙埋后易着生不定根等诸多特性,因此常常形成大小不等的白刺灌丛沙堆。石羊河下游民勤绿洲外围形成了我国干旱区独具特色的以白刺灌丛沙堆与丘间地相间分布的景观格局,对维护该区的生态平衡发挥着重要的作用。随着白刺灌丛沙堆的演替发展,土壤结构会有较大差异,但关于不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤粒径分布及其分形维数特征与土壤理化性质的相互关系的研究较少。鉴于此,以民勤白刺灌丛沙堆为对象,利用野外调查与室内试验相结合的方法,开展白刺灌丛沙堆演替过程中(发育阶段、稳定阶段、衰退阶段、严重衰退阶段)土壤粒度组成、土壤分形维数、土壤理化性质的研究,探析白刺灌丛沙堆演替过程中土壤粒径分布及分形特征与土壤理化

性质的相互关系,以期为干旱荒漠区植被恢复可持续性提供理论和数据参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验研究区设在民勤绿洲-荒漠过渡带,位于巴丹吉林沙漠东南缘(38°34′—39°38′N,102°53′—102°58′E),属于典型的干旱荒漠地区,海拔高度 1 376~1 383 m。该区属于温带大陆性干旱气候,降水量少,多年平均降水量 115.2 mm,集中于 7—9 月;多年平均蒸发量 2 419.6 mm,是降水量的 21 倍;多年平均气温为 7.7℃;热量资源充足,日照时间长,年平均日照时数达 2 832.1 h;风大沙多,年平均风速 2.5 m·s<sup>-1</sup>;土壤类型以风沙土为主;现有的植被主要包括天然和人工 2 种类型,主要的植物有梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白刺、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、盐生草(*Halogeton glomeratus*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)等。

1.2 试验设计与方法

选择白刺灌丛沙堆集中分布地带,根据野外实地调查和已有的划分标准<sup>[15]</sup>,结合白刺灌丛沙堆形态、土壤及植被状况,选择 4 个不同演替阶段白刺灌丛沙堆为研究对象,主要包括发育阶段、稳定阶段、衰退阶段、严重衰退阶段,每个演替阶段沙堆的大小、植被生长状况、风积状况相对一致,以减小试验误差,每个演替阶段 3 次重复。对样地内白刺灌丛沙堆高度、长度以及植被、土壤状况进行调查(表 1)。

表 1 白刺灌丛沙堆形态、植被及土壤特征

Table 1 Shapes,vegetation and soil characteristics of *N. tangutorum* shrub

演替阶段	迎风坡长/cm	背风坡长/cm	高度/cm	植被生长状况	沙堆土壤状况
发育阶段	240	375	80	迎风坡白刺生长较好,结实量大;背风坡白刺稀少	迎风坡为流沙,背风坡有少量结皮
稳定阶段	560	540	182	迎风坡、背风坡白刺多株生长,长势较好,结实多	迎风坡、背风坡均有结皮,沙堆以下为黏土丘间地
衰退阶段	635	618	145	白刺多株生长,枯枝率高,结实率低	迎风坡、背风坡均为结皮,较厚、坚固,沙堆旁边为黏土丘间地
严重衰退阶段	325	230	100	大多数已经枯死	结皮风蚀破裂

1.2.1 土壤样品采集 于 2019 年夏季在不同演化阶段白刺灌丛沙堆顶部的中心位置采集土样,将土层共划分为 4 个层次:0~10、10~20、20~40、40~

60 cm,分别采集 2 份土壤样品,一份用于土壤含水量测定;另一份装入自封袋,带回实验室,测定土壤粒度及养分含量。

1.2.2 指标测定 采集的土壤在室内自然风干后分成 2 部分:一部分用于土壤粒度测定;另一部分用于土壤理化性质的测定。土壤粒度用马尔文激光粒度仪 Malvern Mastersizer 2000 测定,各粒级含量以体积百分含量表示。试验结果以美国制土壤粒径分级标准输出:黏粒( $0\sim 2\ \mu\text{m}$ )、粉粒( $2\sim 50\ \mu\text{m}$ )、极细砂( $50\sim 100\ \mu\text{m}$ )、细砂( $100\sim 250\ \mu\text{m}$ )、中砂( $250\sim 500\ \mu\text{m}$ )、粗砂( $500\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$ )和极粗砂( $1\ 000\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$ )。分形维数采用土壤粒度体积含量数据进行计算,即获取土壤粒度体积分形维数  $D$ <sup>[16]</sup>:

$$\frac{V(r<R_i)}{V_T} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right)^{3-D} \quad (1)$$

式中: $r$  是粒径; $R_i$  表征粒径划分中第  $i$  级粒径; $V(r<R_i)$  为粒径小于  $R_i$  的土壤颗粒体积; $V_T$  为土壤所有颗粒体积; $R_{\max}$  是土壤颗粒中最大粒径;本研究中,粒级最大划分为 64 级,用 64 级粒级数据进行分形维数计算<sup>[17]</sup>。公式(1)两边取对数,由对数曲线的拟合斜率可计算出  $D$  值。

共测定了 6 个土壤因子。具体测定方法如下:采用烘干法测定土壤含水量(%);采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定<sup>[18]</sup>土壤有机质含量(%);采用半微量凯氏法测定<sup>[18]</sup>土壤全 N 含量(%);采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法测定<sup>[18]</sup>土壤速效 P 含量( $\text{mg}\cdot 100\ \text{g}^{-1}$ );采用电导仪法测定<sup>[19]</sup>土壤电导率  $\mu\text{S}$ ;采用电极法测定<sup>[19]</sup>土壤 pH。

### 1.3 数据分析

用 SPSS19.0 软件对试验数据进行统计与分析。用单因素(One-way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析与多重比较,回归分析进行线性拟合,用 Pearson 法对各指标间的相关性进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 白刺灌丛沙堆演替过程中土壤粒度特征

由表 2 可知,民勤干旱荒漠区发育阶段白刺灌丛沙堆土壤以细砂含量最高,为 54.79%,其次为中砂,为 19.30%;其他 3 种演替阶段白刺灌丛沙堆土壤以细砂和极细砂为主,分别为 46.71%~64.06% 和 17.70%~36.29%。经方差分析,除极粗砂外,不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤各粒级含量差异极显著( $P<0.01$ )。黏粒、粉粒、极细砂含量在  $0\sim 60\ \text{cm}$  土层衰退阶段>严重衰退阶段>稳定阶段>发育阶段,发育阶段黏粒、极细砂含量显著( $P<0.05$ )低于其他演替阶段;细砂含量在  $0\sim 60\ \text{cm}$  土层稳定阶段>严重衰退阶段>发育阶段>衰退阶段,差异极显著( $P<0.01$ ),其中稳定阶段细砂含量显著( $P<0.05$ )高于发育与衰退阶段;中砂含量在  $0\sim 60$

$\text{cm}$  土层发育阶段>稳定阶段>衰退阶段>严重衰退阶段,发育阶段中砂含量显著( $P<0.05$ )高于其他演替阶段;粗砂含量在  $0\sim 60\ \text{cm}$  土层发育阶段>衰退阶段>严重衰退阶段>稳定阶段,差异显著( $P<0.05$ ),其中发育阶段粗砂含量显著( $P<0.05$ )高于严重衰退阶段与稳定阶段;极粗砂含量在  $0\sim 60\ \text{cm}$  土层不同演替阶段差异不显著( $P>0.05$ )。综上所述,随着白刺灌丛沙堆不断演替发展,黏粒、粉粒、极细砂含量逐渐增多,到严重衰退阶段降低;细砂含量从发育阶段到稳定阶段呈升高趋势,稳定阶段达到最大,随后呈下降趋势;中砂、粗砂、极粗砂含量整体呈降低趋势,发育阶段含量最高。

发育阶段、稳定阶段白刺灌丛沙堆土壤各粒级在不同土层之间差异不显著( $P>0.05$ );衰退阶段  $0\sim 10\ \text{cm}$  土层黏粒、极细砂含量显著( $P<0.05$ )高于  $40\sim 60\ \text{cm}$  土层,而  $40\sim 60\ \text{cm}$  土层中砂、粗砂含量显著( $P<0.05$ )高于  $0\sim 10\ \text{cm}$  土层;严重衰退阶段  $0\sim 10\ \text{cm}$  土层黏粒、粉粒含量显著( $P<0.05$ )高于其他土层,而  $40\sim 60\ \text{cm}$  土层细砂含量显著( $P<0.05$ )高于  $0\sim 40\ \text{cm}$  土层。

4 个演替阶段土壤分形维数变化范围为 1.665~2.242,随着白刺灌丛沙堆的演替,分形维数呈先升高后降低趋势,衰退阶段达到最大,发育阶段白刺灌丛沙堆  $0\sim 60\ \text{cm}$  土壤分形维数显著( $P<0.05$ )低于其他 3 个演替阶段,其他 3 个演替阶段差异不显著( $P>0.05$ )。同时,4 个演替阶段中表层  $0\sim 10\ \text{cm}$  分形维数高于其他土层。

### 2.2 土壤粒度分形维数与粒径分布的关系

由表 3 可知,除细砂、粗砂、极粗砂以外,土壤分形维数与其他粒级颗粒百分含量间呈一定的线性关系。分形维数与黏粒、粉粒、极细砂、中砂的拟合程度均较好,决定系数介于 0.573~0.783,且分形维数与黏粒、粉粒、极细砂呈极显著正相关( $P<0.01$ ),表明土壤中细颗粒物质越多,分形维数值越大;与中砂呈极显著负相关( $P<0.01$ ),即土壤中砂粒含量越高,分形维数值越小。

### 2.3 不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤理化性质

由表 4 可知,不同演替阶段白刺灌丛沙堆  $0\sim 60\ \text{cm}$  土壤含水量随土层增加整体呈增加趋势。经方差分析,衰退阶段白刺灌丛沙堆土壤含水量显著( $P<0.05$ )高于发育、严重衰退阶段,与稳定阶段差异不显著( $P>0.05$ )。不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤有机质、全氮、速效磷含量均表现出随土层增加而降低的趋势,其表层( $0\sim 10\ \text{cm}$ )含量最大,表聚性明显。经方差分析,4 个演替阶段白刺灌丛沙堆

0~60 cm 土壤有机质、全氮、速效磷含量差异显著 ( $P<0.05$ ),变化规律为衰退阶段>严重衰退阶段>稳定阶段>发育阶段,其中衰退阶段显著 ( $P<0.05$ )高于稳定、发育阶段,与严重衰退阶段差异不显著 ( $P>0.05$ ),而稳定与发育阶段差异不显著 ( $P>0.05$ )。4 个演替阶段白刺灌丛沙堆 0~60 cm 土壤电导率差异不显著 ( $P>0.05$ ),变化规律为衰退阶段>严重衰退阶段>稳定阶段>发育阶段,其中衰退阶段显著 ( $P<0.05$ )高于发育阶段。4 个演替阶段白刺灌丛沙堆 0~60 cm 土壤 pH 差异显著 ( $P<0.05$ ),变化规律与其他指标相反,发育阶段显著 ( $P<0.05$ )高于衰退阶段。4 个演替阶段白刺灌丛沙堆不同土层有机质、速效磷、pH 差异不显著 ( $P>0.05$ );发育、稳定、衰退阶段白刺灌丛沙堆不

同土层全氮含量、电导率差异不显著 ( $P>0.05$ ),而严重衰退阶段表层(0~10 cm)显著 ( $P<0.05$ )高于其他土层。

表 3 分形维数与各参数间线性拟合关系

Table 3 Linear fitting relationship between fractal dimension and parameters			
粒径分布(%)	拟合公式	相关系数	显著水平(P)
黏粒( $d_1$ )	$D=0.198d_1+1.885$	0.783	0.000
粉粒( $d_2$ )	$D=0.031d_2+1.965$	0.628	0.000
极细砂( $d_3$ )	$D=0.014d_3+1.783$	0.573	0.000
细砂( $d_4$ )	$D=-0.005d_4+2.385$	0.214	0.145
中砂( $d_5$ )	$D=-0.015d_5+2.283$	0.608	0.000
粗砂( $d_6$ )	$D=-0.012d_6+2.141$	0.277	0.057
极粗砂( $d_7$ )	$D=-0.001d_7+2.101$	0.003	0.984

表 2 白刺灌丛沙堆土壤粒度组成

Table 2 Soil particle compositions of *N. tangutorum* shrub

演替阶段	深度/cm	黏粒(%)	粉粒(%)	砂粒(%)					分形维数 D
				极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂	
发育阶段	0~10	0.60±0.21Ca	2.29±0.71Ba	18.49±1.66Ca	57.10±3.43ABa	16.05±2.15Aa	4.98±1.95Aa	0.49±0.40Aa	2.049±0.07Ba
	10~20	0.26±0.26Ba	1.07±0.96Ba	17.08±0.63Ba	55.12±4.30ABa	18.67±1.47Aa	6.95±3.34Aa	0.85±0.80Aa	1.839±0.15Bab
	20~40	0.27±0.25Ba	1.21±0.82Ba	15.16±0.60Ba	54.33±4.91Aa	21.15±2.1Aa	7.46±2.48Aa	0.43±0.17Aa	1.665±0.06Bb
	40~60	0.64±0.03Aa	2.67±0.04Ba	15.03±0.10Aa	52.60±1.93Ba	21.35±2.11Aa	7.32±0.79Aa	0.38±0.20Aa	2.090±0.01Aa
	平均	0.45±0.17C	1.81±0.60B	16.44±0.27B	54.79±3.39BC	19.30±0.15A	6.68±2.01A	0.54±0.29A	1.911±0.06B
稳定阶段	0~10	1.32±0.08Ba	3.27±0.11Ba	24.05±0.97BCa	64.06±0.74Aa	7.02±0.68Ba	0.26±0.17Ba	0.01±0.01Aa	2.192±0.01Aa
	10~20	0.86±0.43ABa	2.71±1.24Ba	24.04±1.30ABa	60.25±2.17Aa	10.88±2.99Aa	1.18±1.05Aa	0.09±0.09Aa	2.075±0.11ABa
	20~40	0.86±0.12ABa	2.85±0.08ABa	21.21±0.61ABa	63.61±2.63Aa	10.70±2.48Ba	0.75±0.75Ba	0.01±0.01Aa	2.119±0.03Aa
	40~60	0.77±0.24Aa	2.96±0.22ABa	21.51±3.36Aa	61.85±2.33Aa	11.65±2.73Ba	1.16±0.36Ba	0.09±0.02Aa	2.082±0.06Aa
	平均	0.95±0.06B	2.95±0.32B	22.70±0.93A	62.44±1.39A	10.06±1.49B	0.84±0.14B	0.05±0.02A	2.117±0.01A
衰退阶段	0~10	2.19±0.36Aa	10.67±2.95Aa	36.29±4.03Aa	46.71±4.65Ca	3.29±2.83Bb	0.84±0.42Bb	0.01±0.01Aa	2.242±0.02Aa
	10~20	1.87±0.34Aab	8.46±2.58Aa	29.35±6.13Aab	47.37±3.47Ba	9.11±6.32Aab	3.65±3.56Aab	0.20±0.20Aa	2.223±0.02Aa
	20~40	1.44±0.26Aab	6.74±2.43Aa	28.87±4.24Aab	52.54±4.94Aa	8.31±3.82ABab	1.88±0.72ABab	0.21±0.21Aa	2.191±0.02Aab
	40~60	0.95±0.07Ab	3.60±0.28Aa	17.70±0.50Ab	49.71±3.46Ba	18.84±0.64Aa	8.68±2.64Aa	0.52±0.38Aa	2.148±0.01Ab
	平均	1.61±0.10A	7.37±0.98A	28.05±2.47A	49.08±1.09C	9.89±2.04B	3.76±0.82AB	0.24±0.13A	2.201±0.01A
严重衰退阶段	0~10	2.19±0.06Aa	9.84±0.95Aa	29.06±2.25ABa	50.95±1.10BCb	6.44±2.77Ba	1.31±0.20Ba	0.20±0.15Aa	2.239±0.01Aa
	10~20	1.29±0.22ABb	5.02±0.45ABb	27.84±3.01ABa	56.00±1.07ABb	8.51±3.71Aa	1.29±0.66Aa	0.06±0.04Aa	2.176±0.03Aab
	20~40	0.98±0.16Ab	3.77±0.46ABb	23.24±3.70ABa	55.68±2.49Ab	10.88±3.55Ba	3.98±2.44ABa	1.47±1.36Aa	2.147±0.02Ab
	40~60	0.98±0.15Ab	3.16±0.21ABb	21.66±2.37Aa	62.78±0.84Aa	10.46±1.89Ba	0.87±0.55Ba	0.09±0.05Aa	2.140±0.02Ab
	平均	1.36±0.10A	5.44±0.20A	25.45±2.72A	56.35±1.10AB	9.07±2.90B	1.86±0.73B	0.46±0.33A	2.175±0.01A

注:不同大写字母表示不同演替阶段同一深度土壤粒度组成差异显著( $P<0.05$ );不同的小写字母表示同一演替阶段不同土层之间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

2.4 土壤理化性质、土壤粒度组成及分形维数间的相关关系

由表 5 可知,黏粒、粉粒及极细砂含量与有机质、全 N、速效 P 含量呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ),且与含水量、电导率、pH 值的相关性不显著 ( $P>0.05$ );细砂含量与有机质、全 N 含量呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ),与 pH 值呈极显著正相关 ( $P<0.01$ );中砂含量与有机质、全 N 含量呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ),与速效 P 含量呈显著负相关 ( $P<0.05$ );粗砂含量与全 N 含量呈显著负相关 ( $P<0.05$ );极粗砂含量与各指标之间相关性不显著 ( $P>0.05$ )。分形维数与有机质、全 N 含量呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ),与速效 P 含量呈显著正相关 ( $P<0.05$ )。综合分析表明,白刺灌丛沙堆土壤粒度的形成受到土壤有机质、全 N、速效 P 及 pH 的影

响较大 ( $P<0.05$ )。

3 结论与讨论

3.1 结论

民勤白刺灌丛发育阶段沙堆土壤以细砂(54.79%)含量最高,其次为中砂(19.30%);其他 3 种演替阶段白刺灌丛沙堆土壤以细砂和极细砂为主,分别为 46.71%~64.06%和 17.70%~36.29%,随着白刺灌丛沙堆的演替,土壤细颗粒呈先增加后降低的趋势,衰退阶段土壤黏粒、粉粒、极细砂含量最高。分形维数与黏粒、粉粒、极细砂呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ),与中砂呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ),表明黏粉粒、极细砂含量越多,土壤分形维数越高。土壤分形维数与土壤养分之间存在显著相关性,因此可以用分形维数来反映土壤质地及



肥力状况。白刺灌丛沙堆充分发挥了防风固沙作用以及对土壤的保育功能,有利于改善土壤结构和肥力,为荒漠生态系统的恢复和重建提供物质保障。

### 3.2 讨论

3.2.1 白刺灌丛沙堆演替过程中土壤粒度组成与分形维数 土壤颗粒组成受母质特征及环境变化的影响<sup>[20]</sup>,在一定程度上决定土壤的基本性状。民勤荒漠—绿洲过渡带生态环境脆弱,近年来,由于土壤水分收支不平衡导致白刺沙堆退化<sup>[21]</sup>。本研究中,白刺灌丛沙堆在演替过程中,土壤粒度组成仍以细砂为主,除极粗砂外,不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤各粒级含量差异极显著( $P < 0.01$ )。其中从发育阶段到稳定阶段粒度组成变化最大,除粉粒与极粗砂外,其他土壤各粒级含量存在显著差异( $P < 0.05$ ),表现为:白刺灌丛沙堆稳定后,黏粒、极细砂、

细砂含量增加,中砂与粗砂含量降低。到衰退阶段,黏粒、粉粒、极细砂含量增加,细砂与中砂含量降低,但粗砂与极粗砂含量升高,与稳定阶段相比,黏粒、粉粒增加显著,细砂显著降低( $P < 0.05$ )。严重衰退阶段,白刺灌丛沙堆活化,黏粒、粉粒、极细砂含量降低,砂粒含量增加。本研究中,白刺灌丛沙堆处衰退阶段时,黏粒、粉粒含量相对较高,砂粒含量降低,主要是因为该阶段处于白刺灌丛沙堆衰退初期,与稳定阶段相比,白刺存在一定的枯枝率,但是覆盖度仍较高,以及沙堆表层结皮较厚、坚固,有效地减弱了风力对灌丛沙堆土壤黏粒、粉粒的吹蚀。从整个土层垂直剖面来看,发育、稳定阶段白刺灌丛沙堆土壤黏粒、粉粒含量表现为“高一低一高”,衰退阶段与严重衰退阶段表现为“高一低”。

表 4 白刺灌丛沙堆土壤理化性质

Table 4 Soil physical and chemical properties of *N. tangutorum* shrub

演替阶段	土层	含水量 (%)	有机质 (%)	全氮 (%)	速效磷 /[mg · (100 g) <sup>-1</sup> ]	电导率 /μS	pH
发育阶段	0~10	0.17±0.03Ac	0.16±0.02Ba	0.0073±0.001Ca	0.57±0.14Ba	178.33±13.79Ab	8.95±0.06Aa
	10~20	0.38±0.02Abc	0.12±0.02Ba	0.0078±0.001Ba	0.63±0.29Ba	433.67±86.19Aa	8.63±0.12Aab
	20~40	0.55±0.10Bab	0.09±0.03Ba	0.0061±0.001Aa	0.74±0.34Aa	464.00±90.86Ca	8.51±0.18Ab
	40~60	0.76±0.12Aa	0.09±0.01Ca	0.0064±0.001Ba	0.44±0.08Aa	406.67±31.84Ba	8.72±0.11Aab
	平均	0.47±0.07B	0.115±0.01C	0.007±0.001B	0.59±0.21B	370.67±51.18B	8.70±0.10A
稳定阶段	0~10	0.23±0.02Ab	0.23±0.02ABa	0.0080±0.001BCa	0.86±0.31Ba	251.67±72.15Ab	8.76±0.18Aa
	10~20	0.46±0.04Ab	0.22±0.02ABa	0.0073±0.001Ba	0.86±0.13Ba	483.67±124.49Aab	8.67±0.20Aa
	20~40	0.79±0.12ABa	0.20±0.02ABa	0.0074±0.001Aa	0.81±0.31Aa	584.33±35.91BCa	8.68±0.09Aa
	40~60	1.01±0.12Aa	0.19±0.04Ba	0.0065±0.001Ba	0.52±0.06Aa	470.67±33.63Bab	8.62±0.08Aa
	平均	0.62±0.07AB	0.208±0.01BC	0.007±0.001B	0.76±0.14B	447.58±26.08AB	8.69 ±0.06A
衰退阶段	0~10	0.21±0.08Ac	0.58±0.10ABa	0.0244±0.007Aa	1.93±0.19Aa	230.00±88.11Aa	8.62±0.17Aa
	10~20	0.61±0.22Abc	0.43±0.16Aa	0.0168±0.005Aa	1.59±0.04Aa	806.67±44.48Aa	8.34±0.28Aa
	20~40	1.06±0.05Aab	0.48±0.19Aa	0.0176±0.007Aa	1.48±0.20Aa	998.00±40.20Aa	8.11±0.04Ba
	40~60	1.21±0.23Aa	0.31±0.02Aa	0.0095±0.001Aa	1.44±0.54Aa	689.67±73.30Aa	8.31±0.09Ba
	平均	0.77±0.07A	0.450±0.08A	0.017±0.001A	1.61 ±0.15A	681.08±36.64A	8.35 ±0.10B
严重衰退阶段	0~10	0.13±0.03Ac	0.77±0.33Aa	0.0197±0.002ABa	2.01±0.29Aa	181.33±49.45Aa	8.66±0.09Aa
	10~20	0.33±0.03Abc	0.23±0.02ABab	0.0113±0.001ABb	0.70±0.03Bb	616.00±22.39Ab	8.41±0.15Aab
	20~40	0.55±0.11Bb	0.19±0.04ABb	0.0096±0.001Ab	0.97±0.18Aab	796.33±34.55ABb	8.33±0.03ABb
	40~60	0.83±0.10Aa	0.18±0.03BCb	0.0106±0.001Ab	1.70±0.58Aab	675.33±18.91Ab	8.64±0.03Aa
	平均	0.46±0.06B	0.343±0.08AB	0.013±0.001AB	1.34 ±0.18A	567.25±76.25AB	8.51±0.06AB

表 5 土壤理化性质与土壤粒度组成、分形维数间的相关关系

Table 5 Correlation between soil physical and chemical properties and soil particle size composition and fractal dimension

项目	含水量 (%)	有机质 (%)	全 N (%)	速效 P /[mg · (100 g) <sup>-1</sup> ]	电导率 /μS	pH
黏粒	-0.174	0.723**	0.739**	0.504**	-0.028	-0.125
粉粒	-0.103	0.785**	0.872**	0.531**	0.093	-0.274
极细砂	-0.167	0.623**	0.794**	0.399**	0.041	-0.170
细砂	0.024	-0.442**	-0.511**	-0.256	-0.103	0.353**
中砂	0.170	-0.476**	-0.597**	-0.312*	0.020	0.023
粗砂	0.089	-0.284	-0.339*	-0.236	-0.012	-0.092
极粗砂	-0.039	-0.154	-0.137	-0.180	0.068	-0.106
分形维数	0.016	0.450**	0.407**	0.317*	0.043	-0.034

注: \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关; \* 表示在 0.05 水平上显著相关。

土壤粒度分形维数能够反映土壤颗粒分布及质地的均匀程度<sup>[22-23]</sup>,一般来说土壤分形维数越大,土壤抗侵蚀能力越强<sup>[24]</sup>。本研究中,4个演替阶段土壤分形维数变化范围为1.665~2.242,发育阶段白刺灌丛沙堆0~60 cm土壤分形维数显著( $P < 0.05$ )低于其他3个演替阶段,其他3个演替阶段差异不显著( $P > 0.05$ ),说明白刺灌丛沙堆对土壤分形维数的影响较大,发育阶段白刺灌丛沙堆植被覆盖度相对较低,风蚀严重,土壤黏粉粒被风蚀。结果表明,分形维数与黏粒、粉粒、极细砂呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与中砂呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),表明土壤粒度分形维数较好地反映了白刺灌丛沙堆的颗粒粗细状况,且分形维数随着黏粒、粉粒与极细砂含量的增加而增大,随着中砂含量的增加而减小。因此,土壤分形维数在一定程度上能够反映土壤粒径的分布状况和土壤质地的均匀程度,并作为判断土壤质地差异的重要指标。

3.2.2 分形维数与土壤颗粒组成与理化性质的关系 土壤颗粒组成影响土壤养分的供应与植物的生长发育。土壤养分含量主要与土壤细颗粒含量有关,即土壤细颗粒物质的含量更能够反映土壤质量水平<sup>[25]</sup>。本研究发现,黏粒、粉粒及极细砂含量与有机质、全N、速效P含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ );细砂含量与有机质、全N含量呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),与pH值呈极显著正相关( $P < 0.01$ );中砂含量与有机质、全N含量呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),与速效P含量呈显著负相关( $P < 0.05$ );粗砂含量与全N含量呈显著负相关( $P < 0.05$ );极粗砂含量与各指标之间相关性不显著( $P > 0.05$ )。这表明,土壤黏粒、粉粒及极细砂含量与土壤养分含量密切相关,这与前人的研究结果相一致<sup>[25]</sup>。本研究中,分形维数与有机质、全N含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与速效P含量呈显著正相关( $P < 0.05$ ),同时分形维数与黏粒、粉粒、极细砂呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),表明土壤颗粒组成特征、分形维数和养分含量三者之间密切相关,土壤中细颗粒含量增多有利于土壤养分的积累,在一定程度上土壤分形维数可以作为土壤质量演变的评价指标。土壤分形维数与含水量、pH间均无显著相关性( $P > 0.05$ ),这与罗雅曦等<sup>[26]</sup>的研究结果相一致,说明土壤颗粒大小不是土壤含水量与pH值变化的主要影响因素。土壤分形维数与电导率无显著相关性( $P > 0.05$ ),这与蒋嘉瑜<sup>[27]</sup>的研究结果一致,可能与研究区恶劣的自然环境状况有关,使盐碱程度受土壤颗粒组成影响比较小。

## 参考文献:

- [1] QI F, ZHANG R, LIU X, *et al.* Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 184: 45-51.
- [2] 柴雯, 王根绪, 李元寿, 等. 长江源区不同植被覆盖下土壤水分对降水的响应[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(2): 329-337.  
CHAI W, WANG G X, LI Y S, *et al.* Response of soil moisture under different vegetation coverage to precipitation in the headwaters of the Yangtze River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(2): 329-337. (in Chinese)
- [3] 茹豪, 张建军, 李玉婷, 等. 黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 176-182.  
RU H, ZHANG J J, LI Y T, *et al.* Fractal features of soil particle size distributions and its effect on soil erosion of Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 176-182. (in Chinese)
- [4] LIU X, ZHANG G, HEATHMAN G C, *et al.* Fractal features of soil particle size distribution as affected by plant communities in the forested region of mountain Yimeng, China[J]. *Geoderma*, 2009, 154: 123-130.
- [5] 刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 267-273.  
LIU J Y, ZHOU Z C, SU X M. Review of the mechanism of root system on the formation of soil aggregates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3): 267-273. (in Chinese)
- [6] 杨才敏. 土壤有机质与水土流失的关系定量研究[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(5): 177-179.  
YANG C M. Quantitative study on the relation of soil organic content and soil and water losses[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(5): 177-179. (in Chinese)
- [7] LIU X, LI Z, LI P. Particle fractal dimension and total phosphorus of soil in a typical watershed of Yangtze River, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73: 6091-6099.
- [8] ZHAO C L, SHAO M A, JIA X X, *et al.* Particle size distribution of soils(0-500 cm) in the Loess Plateau, China[J]. *Geoderma Regional*, 2016, 7: 251-258.
- [9] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(4): 987-996.
- [10] MANDELBROT B B, MULVEY C. Box-counting method for fractal dimension[J]. *Journal of the Royal Society of London*, 1980, 13: 1-234.
- [11] WANG J, ZHANG M, BAI Z K, *et al.* Multi-fractal characteristics of the particle distribution of reconstructed soils and the relationship between soil properties and multi-fractal parameters in an opencast coal-mine dump in a loess area[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(8): 4749-4762.
- [12] GUI D W, LEI J Q, ZENG F J. Ordination as a tool to characterize soil particle size distribution, applied to an elevation gradient at the north slope of the Middle Kunlun Mountains[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3): 352-358.
- [13] 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.
- [14] 刘金伟,李志忠,武胜利,等. 新疆艾比湖周边白刺沙堆形态特征空间异质性研究[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(4): 628-635.
- LIU J W, LI Z Z, WU S L, *et al.* The spatial heterogeneity of morphologic feature of *Nitraria nebkhas* around Ebinur Lake, Xinjiang[J]. *Journal of desert research*, 2009, 29(4): 628-635. (in Chinese)
- [15] DU J H, YAN P, E Y H. Distribution patterns and characteristics of *Nitraria tangutorum nebkha* at its different evolution stages in the Minqin County of Gansu Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(8): 1165-1170.
- [16] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. *Soil Sci. SOC. A. M.*, 1992, 56: 362-369.
- [17] WANG D, FU B J, ZHAO W W, *et al.* Multifractal characteristics of soil particle size distribution under different land-use types on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2008, 72: 39-36.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-204.
- [19] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 508-510.
- [20] 拓飞, 董治宝, 南维鸽, 等. 沙地柏人工林和天然林风沙土特性研究[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(2): 80-87.
- TUO F, DONG Z B, NAN W G, *et al.* Study on the characteristics of Aeolian sandy soils in plantation and natural stand of *Sabina vulgaris* [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(2): 80-87. (in Chinese)
- [21] 王月, 李程, 李爱德, 等. 白刺沙堆退化与土壤水分的关系[J]. *生态学报*, 2015, 35(5): 1407-1421.
- WANG Y, LI C, LI A D, *et al.* The degradation of *Nitraria* dunes and soil water in Minqin oasis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(5): 1407-1421. (in Chinese)
- [22] 马成忠, 邓继峰, 丁国栋, 等. 不同初植密度樟子松人工林对毛乌素沙地南缘土壤粒度特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 230-235.
- MA C Z, DENG J F, DING G D, *et al.* Effects of different planting densities of Mongolian pine on the soil particle size characteristics in southern Mu Us desert [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1): 230-235. (in Chinese)
- [23] 陈浩. 黄土高原退耕还林前后流域土壤侵蚀时空变化及驱动因素研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2019.
- [24] 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. (in Chinese)
- [25] 桑巴叶, 朱玉伟, 刘康, 等. 伊犁河谷不同森林模式下土壤的养分特征和粒径组成[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(5): 328-332.
- SANG B Y, ZHU Y W, LIU K, *et al.* Soil nutrients properties and particle size composition under different forest pattern in Ili River Valley[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(5): 328-332. (in Chinese)
- [26] 罗雅曦, 刘任涛, 张静, 等. 腾格里沙漠草方格固沙林土壤颗粒组成、分形维数及其对土壤性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 525-535.
- LUO Y X, LIU R T, ZHANG J, *et al.* Soil particle composition, fractal dimension and their effects on soil properties following sand-binding revegetation within straw checkerboard in Tengger Desert, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 525-535. (in Chinese)
- [27] 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): 54-69.
- 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): 54-69. (in Chinese)