

# 干旱荒漠区不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤粒度特征

王 飞<sup>1,2</sup>,郭树江<sup>1,3\*</sup>,张卫星<sup>1</sup>,王方琳<sup>1,2</sup>,韩福贵<sup>1,2</sup>,李金辉<sup>1,2</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:**为探讨干旱荒漠区白刺灌丛沙堆土壤粒度特征,以民勤不同演替阶段(发育、稳定、衰退、严重衰退)白刺灌丛沙堆为对象,分别采集0~100 cm土层土壤样本,测定土壤粒度组成,计算并分析粒度参数。结果表明:1)干旱荒漠区发育阶段白刺灌丛沙堆土壤以细砂(50.04%~57.10%)和中砂(16.05%~22.03%)为主,稳定、衰退、严重衰退演替阶段白刺灌丛沙堆土壤以细砂(46.71%~64.06%)和极细砂(17.14%~29.06%)为主。2)平均粒径介于极细砂、细砂和中砂(1.92~3.17 $\phi$ ),分选系数介于较好和较差之间(0.69~1.41),偏度负偏至正偏(-0.141~0.299),峰度中等至很尖锐(1.01~1.99),分形维数(1.665~2.242)。随着白刺灌丛沙堆的演替发展,平均粒径变细、细粒物质所占比重增大,分选系数从中等、较好-中等之间、较差、中等-较差,粒度频率曲线变窄。3)从垂直分布来看,4个演替阶段不同土层粒度参数差异不显著。在0~10 cm土层中,不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤粒度参数存在极显著差异( $P<0.01$ )。

**关键词:**演替阶段;白刺灌丛沙堆;土壤粒度特征;干旱荒漠区

**中图分类号:**S718.516      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2020)01-00015-06

## Soil Grain-size Characteristics of *Nitraria tangutorum* at Different Succession Stages in Desert Area

WANG Fei<sup>1,2</sup>, GUO Shu-jiang<sup>1,3\*</sup>, ZHANG Wei-xing<sup>1</sup>, WANG Fang-lin<sup>1,2</sup>, HAN Fu-gui<sup>1,2</sup>, LI Jin-hui<sup>1,2</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:** In order to understand the soil grain-size characteristics of *Nitraria tangutorum* shrub in the desert area, soil samples were collected from six depths (0—100 cm) under the shrubs at different succession stages (developmental stage, stable stage, recession stage, severe recession stage) in Minqin, Gansu Province, from which the physical components of the soil grains and relative parameters were measured and analyzed. The results showed that 1) in developmental stage, the soil was mainly occupied by fine (accounted for 50.04%—57.10% of the total) and middle sized (16.05%—22.03%) sands, and in stable, recession and severe recession stages, the soils were mainly occupied by fine (46.71%—64.06%) and very fine sands (17.14%—29.06%). 2) The mean grain size of the soil ranged from those of very fine, fine and middle sands (1.92—3.17 $\phi$ ); the sorting coefficient ranged from better sorting to worse sorting (0.69—1.41); the skewness ranged from negative to positive bias (-0.141—0.299); the kurtosis ranged from medium to very sharp (1.01—1.99); and the fractal dimension ranged from 1.665—2.242. With the development of

收稿日期:2019-02-20 修回日期:2019-07-03

基金项目:国家青年科学基金项目(31700339);国家地区基金项目(31760238,31860116);甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室项目。

作者简介:王 飞,女,助理研究员,研究方向:荒漠化防治。E-mail:zmfwei@126.com

\* 通信作者:郭树江,男,副研究员,研究方向:荒漠化生态观测。E-mail:shujguo@126.com

the shrubs, the mean diameter of the soil grain became smaller, and the proportion of fine particles increased; the sorting coefficient underwent medium-good, medium-poor-poor; the particle size frequency curve became narrow. 3) From the perspective of vertical distribution, there was no significant difference in the parameters of soil particle size at the four stages. In the 0—10 cm soil layer, there were extremely significant differences in soil particle size parameters in different succession stages of *N. tangutorum* shrubs ( $P<0.01$ ).

**Key words:** succession stage; *Nitraria tangutorum*; soil grain-size characteristic; desert area

土壤在陆地生态系统中处于各环境要素紧密交接的地带,是连接各环境要素的枢纽。粒度特征是土壤物理属性的重要方面,粒度组成不仅影响土壤的物理、化学和生物性质,而且对土壤的紧实度、保水性、抗蚀性、土壤养分等有显著影响<sup>[1]</sup>。灌丛沙堆是在植被影响下发育的一种风力沉积地貌,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。民勤属于典型的极端干旱区,白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛抗旱耐贫瘠,喜沙埋,是民勤干旱荒漠区目前存活面积最大的天然植被类型,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,对于防止流沙入侵绿洲、保持绿洲稳定性发挥着巨大的生态作用。目前,有关民勤白刺灌丛沙堆的研究主要集中在土壤呼吸<sup>[2-4]</sup>、种子库<sup>[5]</sup>、群落特征<sup>[6]</sup>等方面,对于其土壤粒度特征的研究比较少。本研究通过对民勤不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤粒度特征进行研究,对比分析不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤粒度组成及其平均粒径( $do$ )、分选系数( $\delta o$ )、偏态系数(SO)、峰值(KO)和分形维数(D),揭

示不同演替阶段白刺灌丛沙堆对土壤粒度特征的影响,以期为我国干旱半干旱地区白刺灌丛沙堆退化机制提供可靠的数据支持,以及为该区可持续发展研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验样地选择及设置

本试验样地位于甘肃省民勤治沙综合试验站(103°05' E, 38°35' N)2号与3号降尘观测塔附近,该区为民勤绿洲-荒漠过渡带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>[7]</sup>,结合白刺灌丛沙堆形态、土壤及植被状况,选择了4个不同演替阶段白刺灌丛沙堆作为研究对象,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,不同演替阶段白刺灌丛沙堆基本特征见表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 *Nitraria tangutorum* shrubs at different succession stages

cm

演替阶段	迎风坡长	背风坡长	高度	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,结实时量大;背风坡植被生长较差,结实时量少	迎、背风坡为流沙,沙堆以下为黏土丘间地
稳定阶段	560	540	182	迎、背风坡白刺多株生长,长势较好,结实多,无枯枝	迎、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,有结实,植被盖度高	迎、背风坡均为结皮,较厚、坚固。沙堆以下为黏土丘间地
严重衰退阶段	325	230	100	大多数已经枯死	部分结皮风蚀破裂

## 1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集 2018年7—8月,分别在不同演化阶段白刺灌丛沙堆顶部采集土样,土层深度为0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm,采集的土壤放入自封袋带回实验室进行粒度分析。土壤粒径采用马尔文激光粒度仪 Malvern Mastersizer 2000 进行测定。试验分析结果以美国制土壤粒径分级标准输出:黏粒(0~2 μm)、粉粒(2~50 μm)、极细砂(50~100 μm)、细砂(100~250

μm)、中砂(250~500 μm)、粗砂(500~1 000 μm)和极粗砂(1 000~2 000 μm)。

1.2.2 粒度参数计算 土壤的平均粒径、分选系数、偏度、峰态值由 GRADISTAT 软件计算所得。平均粒径  $do$  反映土壤粒度的平均分布情况<sup>[8]</sup>。分选系数  $\delta o$  反映出沙物质粒度分布的分散程度,根据取值范围划分 7 个分选级别:极好( $\delta o \leq 0.35$ )、好( $0.35 < \delta o \leq 0.50$ )、较好( $0.50 < \delta o \leq 0.71$ )、中等( $0.71 < \delta o \leq 1.00$ )、较差( $1.00 < \delta o \leq 2.00$ )、差

( $2.00 < \delta o \leq 4.00$ ) 和极差 ( $\delta o > 4.00$ )<sup>[9]</sup>, 7 个级别从比较集中过渡到比较分散。偏态系数 SO 反映了沙物质粒度粗细分配的对称性, 根据取值范围分 5 个等级: 极负偏度 ( $-1.0 \leq SO < -0.3$ )、负偏度 ( $-0.3 \leq SO < -0.1$ )、近于对称 ( $-0.1 \leq SO < 0.1$ )、正偏度 ( $0.1 \leq SO < 0.3$ ) 和极正偏度 ( $0.3 \leq SO \leq 1.0$ )<sup>[9]</sup>, 5 个等级从细粒物质占比较大过渡到粗粒物质占比较大。峰值 KO 反映了沙物质粒度分布的集中程度, 根据取值范围划分 6 个等级: 很宽平 ( $KO \leq 0.67$ )、宽平 ( $0.67 < KO \leq 0.90$ )、中等 ( $0.90 < KO \leq 1.11$ )、尖窄 ( $1.11 < KO \leq 1.56$ )、很尖窄 ( $1.56 < KO \leq 3.00$ ) 和极尖窄 ( $KO > 3.00$ )<sup>[9]</sup>, 6 个等级从比较分散过渡到比较集中。

**1.2.3 土壤粒度分形维数分析** 分形维数可以反映土壤含水率、土壤肥力、土壤退化程度等性质和特征<sup>[10-12]</sup>。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维值, 计算公式如下<sup>[13]</sup>

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

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;  $VT$  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>[14]</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。

### 1.3 数据分析

应用 Excel 2003 软件进行数据整理, origin 2017 做图, 用 SPSS 11.0 进行差异性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤粒度特征

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和中砂为主, 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。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 ( $P < 0.01$ )。

同一深度土壤粒度特征。黏粒、粉粒含量在 0~100 cm 土层衰退阶段 > 严重衰退阶段 > 稳定阶段 > 发育阶段, 差异极显著 ( $P < 0.01$ ), 且表层 (0~10 cm) 黏粒含量显著 ( $P < 0.05$ ) 高于其他土层; 极细砂含量在 0~100 cm 土层严重衰退阶段 > 衰退阶段 > 稳定阶段 > 发育阶段, 其中表层 (0~10 cm) 与 40~

表 2 不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤粒度组成

Table 2 Soil particle compositions in different succession stages of *Nitraria tangutorum* shrubs

演替阶段	深度/cm	黏粒	粉粒	砂粒					%
				极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂	
发育阶段	0~10	0.60±0.21C	2.29±0.71B	18.49±1.66C	57.10±3.43AB	16.05±2.15A	4.98±1.95A	0.49±0.40A	
	10~20	0.26±0.26B	1.07±0.96B	17.08±0.63B	55.12±4.30AB	18.67±1.47A	6.95±3.34A	0.85±0.80A	
	20~40	0.27±0.25B	1.21±0.82B	15.16±0.60B	54.33±4.91A	21.15±2.1A	7.46±2.48A	0.43±0.17A	
	40~60	0.64±0.03A	2.67±0.04B	15.03±0.10A	52.60±1.93B	21.35±2.11A	7.32±0.79A	0.38±0.20A	
	60~80	0.29±0.09B	2.07±0.23B	15.35±1.31B	50.04±1.69B	21.84±3.39A	9.69±0.12A	0.73±0.47A	
	80~100	0.11±0.02B	1.67±0.10A	14.94±1.11C	55.30±1.89A	22.03±2.52A	5.73±0.05A	0.23±0.01A	
稳定阶段	0~10	1.32±0.08B	3.27±0.11B	24.05±0.97BC	64.06±0.74A	7.02±0.68B	0.26±0.17B	0.01±0.01A	
	10~20	0.86±0.43AB	2.71±1.24B	24.04±1.30AB	60.25±2.17A	10.88±2.99A	1.18±1.05A	0.09±0.09A	
	20~40	0.86±0.12AB	2.85±0.08AB	21.21±0.61AB	63.61±2.63A	10.70±2.48B	0.75±0.75B	0.01±0.01A	
	40~60	0.77±0.24A	2.96±0.22AB	21.51±3.36A	61.85±2.33A	11.65±2.73B	1.16±0.36B	0.09±0.02A	
	60~80	0.45±0.11B	1.68±0.46B	17.14±1.64B	62.08±3.90A	16.00±0.97AB	2.37±1.24B	0.29±0.13A	
	80~100	0.60±0.35B	2.00±0.92A	17.53±2.54BC	60.29±3.95A	16.48±4.24AB	2.98±2.18AB	0.12±0.09AB	
衰退阶段	0~10	2.19±0.36A	10.67±2.95A	36.29±4.03A	46.71±4.65C	3.29±2.83B	0.84±0.42B	0.01±0.01A	
	10~20	1.87±0.34A	8.46±2.58A	29.35±6.13A	47.37±3.47B	9.11±6.32A	3.65±3.56A	0.20±0.20A	
	20~40	1.44±0.26A	6.74±2.43A	28.87±4.24A	52.54±4.94A	8.31±3.82AB	1.88±0.72AB	0.21±0.21A	
	40~60	0.95±0.07A	3.60±0.28A	17.70±0.50A	49.71±3.46B	18.84±0.64A	8.68±2.64A	0.52±0.38A	
	60~80	0.90±0.20AB	3.65±0.56AB	20.44±0.77AB	55.41±1.89AB	14.90±1.00AB	4.36±1.62B	0.33±0.33A	
	80~100	2.31±0.92A	13.84±7.19A	23.38±2.41AB	47.39±6.42A	11.97±3.37B	1.12±0.85B	0.00B	
严重衰退阶段	0~10	2.19±0.06A	9.84±0.95A	29.06±2.25AB	50.95±1.10BC	6.44±2.77B	1.31±0.20B	0.20±0.15A	
	10~20	1.29±0.22AB	5.02±0.45AB	27.84±3.01AB	56.00±1.07AB	8.51±3.71A	1.29±0.66A	0.06±0.04A	
	20~40	0.98±0.16A	3.77±0.46AB	23.24±3.70AB	55.68±2.49A	10.88±3.55B	3.98±2.44AB	1.47±1.36A	
	40~60	0.98±0.15A	3.16±0.21AB	21.66±2.37A	62.78±0.84A	10.46±1.89B	0.87±0.55B	0.09±0.05A	
	60~80	1.33±0.35A	4.68±0.88A	27.23±4.41A	55.13±1.57AB	8.84±4.64B	2.68±1.65B	0.11±0.08A	
	80~100	1.24±0.20AB	5.64±1.42A	28.81±3.36A	52.49±2.38A	8.92±2.22B	2.80±0.52AB	0.09±0.06AB	

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 ( $P < 0.05$ )。

100 cm 土层差异显著( $P<0.05$ )；细砂含量在 0~100 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( $P<0.01$ )；中砂含量在 0~100 cm 土层发育阶段>稳定阶段>衰退阶段>严重衰退阶段,差异极显著( $P<0.01$ )；粗砂含量在 0~100 cm 土层发育阶段>衰退阶段>严重衰退阶段>稳定阶段；极粗砂含量在 0~100 cm 土层发育阶段>严重衰退阶段>衰退阶段>稳定阶段,差异

不显著。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,中砂、粗砂、极粗砂呈降低趋势(图 1)。

不同深度土壤粒度特征。发育阶段、稳定阶段白刺灌丛沙堆土壤各粒级在 0~100 cm 差异不显著,衰退阶段土壤极细砂含量 0~10 cm 显著高于其他土层,严重衰退阶段中粉粒含量 0~10 cm 显著高于其他土层。

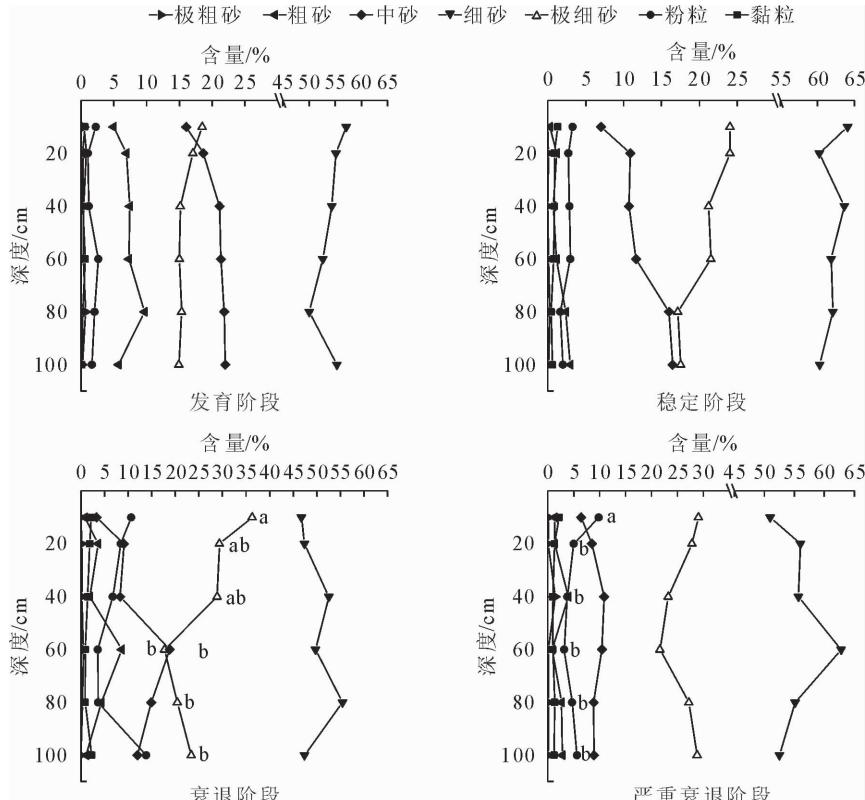


图 1 粒级随深度的变化

Fig. 1 Variations of grain size with the soil depth

## 2.2 不同演替阶段白刺沙堆土壤粒度参数

**2.2.1 平均粒径** 平均粒径反映出沙物质粒度平均分布状况<sup>[8]</sup>,平均粒径越大,细粒物质所占比重越大。民勤不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤平均粒径介于极细砂、细砂和中砂(1.92~3.17 $\phi$ )。由表 3 可知,4 个演替阶段不同土层(0~100 cm)平均粒径都不显著,都表现为随着土层的增加而降低。在相同土层中,不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤平均粒径存在差异,其中,在 0~10 cm 土层,不同演替阶段土壤平均粒径差异极显著( $P<0.01$ ),衰退阶段>严重衰退阶段>稳定阶段>发育阶段,这就表明随着白刺灌丛沙堆演替阶段的变化,土壤的细粒物质增多,土壤结构细化,白刺对于土壤粒度组成发挥了积极作用；在 20~80 cm,不同演替阶段土壤平均粒径差异显著( $P<0.05$ ),在 10~20 cm,80~100 cm 差异不显著。

**2.2.2 分选系数** 由表 4 可知,研究区内不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤粒度分选系数在 0.69~1.41 范围内,按照福克的分选等级标准,其分选状况介于较好和较差之间,其中稳定阶段分选系数在 0.69~0.83,处于分选较好与中等之间,是 4 个演替阶段中分布最为集中；发育阶段分选中等；衰退阶段与严重衰退阶段分选较差。经方差分析,发育阶段、稳定阶段、衰退阶段、严重衰退阶段不同土层的分选系数差异不显著,严重衰退阶段的表层 0~10 cm 分选系数显著高于其他土层。在相同的土层中,不同的演替阶段白刺灌丛沙堆土壤分选系数存在差异,其中,在 0~10 cm 土层,不同演替阶段土壤分选系数差异极显著( $P<0.01$ ),严重衰退阶段>衰退阶段>发育阶段>稳定阶段；10~40 cm 差异不显著；40~60 cm,不同演替阶段土壤分选系数差异极显著( $P<0.01$ ),衰退阶段>发育阶段>稳定阶段>严重衰退

阶段;60~100 cm,差异不显著。

**2.2.3 偏态系数** 由表5可知,按照偏度等级划分标准,发育阶段偏度状况为负偏、近对称;稳定阶段处于近对称;衰退阶段处于正偏、近对称;严重衰退阶段处于正偏、近对称。这就表明不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤沙物质粒度粗细分配的对称性存在差异,其中稳定阶段对称性最好,其次是发育阶段、严重衰退阶段、衰退阶段。这就说明在白刺的影响下,不同演

替阶段白刺灌丛沙堆土壤粒度含量存在差异。经方差分析,4个演替阶段白刺灌丛沙堆土壤不同土层偏态系数差异不显著。在相同的土层中,不同的演替阶段白刺灌丛沙堆土壤偏态系数存在差异,其中,在0~10 cm土层,不同演替阶段土壤偏态系数差异极显著( $P<0.01$ ),衰退阶段>严重衰退阶段>稳定阶段>发育阶段;10~20 cm差异不显著;20~60 cm,差异显著;60~100 cm,差异不显著。

表3 不同演替阶段白刺沙堆土壤平均粒径

Table 3 Soil mean diameters of *N. tangutorum* shrubs at different succession stages

μm

演替阶段	土层深度/cm					
	0~10	10~20	20~40	40~60	60~80	80~100
发育阶段	2.47±0.05Ca	2.32±0.07Aab	2.28±0.08Bab	2.31±0.05Bab	1.95±0.29Bb	1.92±0.20Bb
稳定阶段	2.78±0.03Ba	2.70±0.08Aab	2.67±0.05Aab	2.66±0.09Aab	2.49±0.01ABb	2.48±0.13ABb
衰退阶段	3.17±0.15Aa	2.87±0.29Aa	2.88±0.16Aa	2.36±0.09Ba	2.55±0.04Aa	3.14±0.45Aa
严重衰退阶段	3.00±0.04ABa	2.83±0.10Aa	2.71±0.09Aa	2.68±0.07Aa	2.78±0.17Aa	2.84±0.12Aa

注:同一列不同大写字母表示不同演替阶段的粒度组成差异显著( $P<0.05$ )。同一行不同小写字母表示不同深度的粒度组成差异显著( $P<0.05$ )。下同。

表4 不同演替阶段白刺沙堆土壤分选系数

Table 4 Soil sorting coefficients of *N. tangutorum* shrubs at different succession stages

演替阶段	土层深度/cm					
	0~10	10~20	20~40	40~60	60~80	80~100
发育阶段	0.89±0.09Ba	0.94±0.14ABa	0.92±0.09Aa	0.96±0.03Aa	0.96±0.03Aa	0.81±0.08Aa
稳定阶段	0.69±0.01Ba	0.83±0.03Ba	0.72±0.05Aa	0.74±0.02Ba	0.76±0.07Aa	0.79±0.07Aa
衰退阶段	1.15±0.10Aa	1.17±0.08Aa	1.02±0.11Aa	1.05±0.09Aa	0.99±0.08Aa	1.41±0.32Aa
严重衰退阶段	1.25±0.08Aa	0.97±0.09ABb	0.85±0.14Ab	0.73±0.02Bb	0.92±0.06Ab	0.96±0.07Ab

表5 不同演替阶段白刺沙堆土壤偏态系数

Table 5 Soil skewness coefficient of *N. tangutorum* shrubs at different succession stages

演替阶段	土层深度/cm					
	0~10	10~20	20~40	40~60	60~80	80~100
发育阶段	-0.103±0.05Ca	-0.141±0.05Ba	-0.109±0.02Ba	-0.086±0.03Ba	-0.031±0.11Aa	0.046±0.08Aa
稳定阶段	0.059±0.01Ba	0.049±0.10ABa	0.023±0.02ABa	0.005±0.02Aa	-0.042±0.03Aa	-0.015±0.04Aa
衰退阶段	0.299±0.03Aa	0.193±0.11Aabc	0.136±0.08Aabc	-0.097±0.02Bc	-0.023±0.09Abc	0.248±0.15Aab
严重衰退阶段	0.298±0.01Aa	0.145±0.09ABab	0.063±0.04Ab	0.019±0.03Ab	0.065±0.12Aab	0.040±0.09Ab

**2.2.4 峰值** 按照土壤粒度分布峰度等级标准,发育、稳定阶段为中等(正态),衰退、严重衰退为很尖锐。这就说明土壤粒度随着演化阶段变化,集中程度更高。经方差分析,4个演替阶段白刺灌丛沙堆土壤不同土层峰值差异不显著(表6)。在相同的土层中,不同的演替阶段白刺灌丛沙堆土壤峰值存在差异,其中,在0~10 cm土层,不同演替阶段土壤峰值差异极显著( $P<0.01$ ),衰退阶段>严重衰退阶段>发育阶段>稳定阶段;10~100 cm差异不显著。

**2.2.5 分形维数** 由表7可知,随着演替阶段变化,分形维数呈增大趋势,其中衰退阶段达到最大。同时,4个演替阶段中表层0~10 cm高于其他土层。相关研究表明,土壤分形维数与黏粒、粉粒含量

呈显著正相关,与砂粒含量呈负相关<sup>[15]</sup>,研究区不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤分形维数增加说明土壤正经历细化的过程,黏粒和粉粒的比重不断增加,土壤结构不断得到改善,然后随着白刺灌丛沙堆的衰退,分形维数呈降低趋势。

### 3 结论与讨论

民勤属于干旱荒漠区,生态环境脆弱,降水稀少,风大沙多,土壤风蚀现象异常严重,是研究土壤荒漠化现象的热点地区之一。本研究表明,民勤干旱荒漠区发育阶段的白刺灌丛沙堆土壤以细砂和中砂为主,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。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

表 6 不同演替阶段白刺沙堆土壤峰值

Table 6 Kurtosis of *N. tangutorum* shrubs at different succession stages

演替阶段	土层深度/cm					
	0~10	10~20	20~40	40~60	60~80	80~100
发育阶段	1.09±0.08Ba	0.99±0.01Aa	1.01±0.04Ba	1.06±0.04Aa	1.01±0.03Aa	1.04±0.07Aa
稳定阶段	1.07±0.01Ba	1.24±0.20Aa	1.02±0.01Ba	1.04±0.01Aa	1.01±0.02Aa	1.03±0.03Aa
衰退阶段	1.99±0.06Aa	1.67±0.30Ab	1.58±0.27Ab	1.05±0.05Ab	1.29±0.18Ab	1.45±0.25Ab
严重衰退阶段	1.98±0.06Aa	1.57±0.25Ab	1.23±0.17ABb	1.06±0.01Ab	1.40±0.29Ab	1.39±0.21Ab

表 7 不同演替阶段白刺沙堆土壤分形维数

Table 7 Fractal dimension of *N. tangutorum* shrubs at different succession stages

演替阶段	土层深度/cm					
	0~10	10~20	20~40	40~60	60~80	80~100
发育阶段	2.049±0.07Ba	1.839±0.15Bab	1.665±0.06Bb	2.090±0.01Ab	1.930±0.01Bab	1.878±0.02Bab
稳定阶段	2.192±0.01Aa	2.075±0.11ABA	2.119±0.03Aa	2.082±0.06Aa	2.013±0.05Ba	2.024±0.11ABA
衰退阶段	2.242±0.02Aa	2.223±0.02Aa	2.191±0.02Aa	2.148±0.01Aa	2.124±0.03Aa	2.228±0.06Aa
严重衰退阶段	2.239±0.01Aa	2.176±0.03Aa	2.147±0.02Aa	2.140±0.02Aa	2.176±0.03Aa	2.170±0.02Aa

( $P<0.01$ )。这就说明随着白刺灌丛沙堆演替阶段的发展,土壤粒度组成特征也随之发生了很大改变。

植物能够降低风速,沉积风沙流中的物质,从而影响沙堆形态以及沉积物特点,而植物根系及残留物能够改善土壤的理化性质,增强沙粒黏结性,使土壤结构更加稳定<sup>[16-18]</sup>。由本研究粒度参数可知,发育阶段平均粒径(1.92~2.47 $\phi$ ),分选中等,负偏、近对称,中等(正态);稳定阶段平均粒径(2.48~2.78 $\phi$ ),分选较好与中等之间,近对称,中等(正态);衰退阶段平均粒径(2.36~3.17 $\phi$ ),分选较差,正偏、近对称,很尖锐;严重衰退阶段平均粒径(2.68~3.00 $\phi$ ),分选较差,正偏、近对称,很尖锐。这就说明随着白刺灌丛沙堆的演替发展,平均粒径变细、细粒物质所占比重增大,分选系数从中等一较好、中等之间一较差一较差,粒度频率曲线变窄,说明白刺通过影响土壤粒度特征进而影响灌丛沙堆的演替发展。本研究中,稳定阶段白刺灌丛沙堆平均粒径(2.48~2.78 $\phi$ ),分选较好与中等之间,近对称,中等(正态),主要是因为该演替阶段的白刺分枝稠密,覆盖度较高,地表粗糙度增大,当风沙流过境时,降低风速,沉积风沙流挟带物质,从而增加了地表细粒物质含量。

从垂直分布来看,4个演替阶段不同土层粒度参数差异不显著。但是,在相同的土层中,不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤粒度参数存在差异,尤其是在0~10 cm 土壤粒度参数存在极显著差异( $P<0.01$ ),这就说明白刺对土壤粒度的影响在0~10 cm较显著,这与马成忠等<sup>[19]</sup>得出的结论一致,即上层土壤恢复速度>下层土壤。

植被与风沙沉积物在共同作用下而形成了民勤

典型的白刺灌丛沙堆,而周边环境因素对白刺灌丛沙堆的形成、发展和演变发挥着重要作用,因此不同演替阶段白刺灌丛沙堆与环境因子关系有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 胡广录,樊立娟,王德金,等.荒漠—绿洲过渡带斑块植被表层土壤颗粒的空间异质性[J].兰州交通大学学报,2013,32(6):159-164.
- [2] 荆虎甲,马全林,张有佳,等.石羊河下游白刺灌丛演替发育过程的土壤呼吸及其影响因素分析[J].中国沙漠,2012,32(1):140-147.
- [3] 孙涛,韩福贵,安富博,等.民勤荒漠绿洲过渡带白刺沙堆土壤呼吸空间异质特征[J].草业科学,2017,34(4):673-684.  
SUN T,HAN F G,AN F B,*et al*. Spatial heterogeneity of soil respiration of *Nitraria tangutorum* nebkhas in the desert-oasis ecotone of Minqin [J]. Pratacultural Science,2017,34(4):673-684. (in Chinese)
- [4] 韩福贵,孙涛,郭树江,等.干旱荒漠区不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤呼吸特征及其影响因素分析[J].西北林学院学报,2017,32(5):1-7.  
HAN F G,SUN T,GUO S J,*et al*. Characteristics of soil respiration of *Nitraria tangutorum* at different succession stages in desert areas & the influencing factors[J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(5):1-7. (in Chinese)
- [5] 马全林,卢琦,魏林源,等.干旱荒漠白刺灌丛植被演替过程土壤种子库变化特征[J].生态学报,2015,35(7):2285-2294.  
MA Q L,LU Q,WEI L Y,*et al*. Varying characteristics of soil seed banks during the succession process of *Nitraria tangutorum* vegetation in an arid desert area [J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(7):2285-2294. (in Chinese)
- [6] 赵鹏,徐先英,屈建军,等.民勤绿洲—荒漠过渡带白刺群落空间分布及其环境解释[J].干旱区研究,2016,33(5):1003-1011.

(下转第 44 页)

- 土资源遥感,2004,16(1):23-26.
- SUN Y J,WANG J F. A method for computation of regional aerial saturation deficiency[J]. Remote Sensing for Land & Resources,2004,16(1):23-26. (in Chinese)
- [17] GONG X Y,CHEN Q,LIN S,*et al*. Tradeoffs between nitrogen-and water-use efficiency in dominant species of the semi-arid stepper of Inner Mongolia[J]. Plant and Soil,2011,340 (1):227-238.
- [18] 李浩,任启文,马香玲,等.冀西北山地油松和落叶松树干液流昼夜变化特征及其与环境因子的关系[J].东北林业大学学报,2018,46(7):18-22.
- [19] 王文,朱烨,诸葛绪霞,等.尾巨桉树干液流特征及其影响因子分析[J].水土保持通报,2013,33(3):159-164.
- [20] 买尔当·克依木,玉米提·哈力克,古丽比亚·乌买尔,等.胡杨树干液流日变化及其与气象因素的相关关系[J].冰川冻土,2018,40(1):166-175.
- [21] 温杰,陈云明,唐亚坤,等.黄土丘陵区油松、沙棘生长旺盛期树干液流密度特征及其影响因素[J].应用生态学报,2017,28 (3):763-771.
- WEN J,CHEN Y M,TANG Y K,*et al*. Characteristics and affecting factors of sap flow density of *Pinus tabuliformis* and *Hippophae rhamnoides* in growing season in the hilly region of the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28(3):763-771. (in Chinese)
- [22] 王华田,马履一.利用热扩散式边材液流探针(TDP)测定树木整株蒸腾耗水量的研究[J].植物生态学报,2002,26(6):661-667.
- [23] 绪海红,郭向红,仇群伊.不同天气条件下苹果树液流日变化规律研究[J].中国农学通报,2015,31(22):120-124.
- XU H H,GUO X H,QIU Q Y. Research on daily variation of sap flow of apple trees under different weather conditions[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2015,31(22):120-124. (in Chinese)
- [24] 朱亚,吕光辉,胡颖颖,等.艾比湖自然保护区胡杨树干液流特征研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(11):69-73.
- [25] 李浩,胡顺军,朱海,等.基于热扩散技术的梭梭树干液流特征研究[J].生态学报,2017,37(21):7187-7196.
- [26] 姚依强,陈珂,王彦辉,等.华北落叶松树干液流速率主要影响因子及关系的时间尺度变化[J].干旱区资源与环境,2017,31 (2):155-161.
- [27] 张静,王力,韩雪,等.不同尺度下黄土塬区19年生苹果树干液流速率与环境因子的关系[J].中国农业科学,2016,49 (13):2583-2592.
- [28] 吴鹏,杨文斌,崔迎春,等.喀斯特区天峨槭树干液流特征及其与环境因子的相关分析[J].生态学报,2017,37(22):7552-7567.
- WU P,YANG W B,CUI Y C,*et al*. Characteristics of sap flow and correlation analysis with environmental factors of *Acer wangchii* in the Karst Area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(22):7552-7567. (in Chinese)

## (上接第20页)

- [7] DU J H,YAN P,E Y H. Distribution patterns and characteristics of *Nitraria tangutorum* nebkha at its different evolvement stages in the Minqin County of Gansu Province [J]. Chinese Journal of Ecology,2007,26(8):1165-1170.
- [8] 杨金玲,李德成,张甘霖,等.土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比[J].土壤学报,2008,45(3):413-419.
- [9] 丁国栋.风沙物理学[M].北京:中国林业出版社,2010.
- [10] 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(3):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,2012,2(3):120-125. (in Chinese)
- [11] 管孝艳,杨培岭,吕烨.基于多重分形的土壤颗粒粒径分布于土壤物理特性关系[J].农业机械学报,2011,42(3):44-50.
- [12] 郑子成,李卫,李廷轩,等.基于分形理论的设施土壤水分特征曲线研究[J].农业机械学报,2012,43(5):49-54.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] SU Y Z,ZHAO H L,ZHANG W Z,*et al*. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification [J]. Geoderma,2004,122(1):43-49.
- [16] 高亚军.陕北农牧交错带土地荒漠化演化机制及土壤质量评价研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2003.
- [17] 邹诚,徐福利,闫亚丹.黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用模式对土壤机械组成和速效养分影响分析[J].中国农学通报,2008,24(12):424-427.
- ZOU C,XU F L,YAN Y D. The analysis of soil mechanical composition and available nutrient under different Land uses patterns in the Loess Hilly Gully Region[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2008,24(12):424-427. (in Chinese)
- [18] LANGFORD R P. Nabkha (coppice dune) fields of south-central New Mexico, U. S. A [J]. Journal of Arid Environment, 2000,46,25-41.
- [19] 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)