

- Research, 2009, 19(9):1639-1645.
- [26] KEARSE M, MOIR R, WILSON A, et al. Geneious basic: an integrated and extendable desktop software platform for the organization and analysis of sequence data[J]. Bioinformatics, 2012, 28(12):1647.
- [27] RIVAS J D L, LOZANOJ J, ORTIZ A R. Comparative analysis of chloroplast genomes: functional annotation, genome-based phylogeny, and deduced evolutionary patterns[J]. Genome Research, 2002, 12(4):567-583.
- [28] DRESCHER A, RUF S, CALSA T, et al. The two largest chloroplast genome-encoded open reading frames of higher plants are essential genes[J]. Plant Journal, 2010, 22(2):97-104.
- [29] 张慧, 何帅兵, 孔繁德, 等. 益母草叶绿体基因组序列与系统进化位置分析[J]. 中医药信息, 2018, 35(4):21-27.
ZHANG H, HE S B, KONG F D, et al. Sequence of chloroplast genome and the phyletic evolution within *Leonurus artemisia* [J]. Information on Traditional Chinese Medicine, 2018, 35(4):21-27. (in Chinese)
- [30] 王玲, 董文攀, 周世良. 被子植物叶绿体基因组的结构变异研究进展[J]. 西北植物学报, 2012, 32(6):1282-1288.
WANG L, DONG W P, ZHONG S L. Structural mutations and reorganizations in chloroplast genomes of flowering plants [J]. Acta Bot. Boreal- Occident. Sin, 2012, 36(6):1282-1288. (in Chinese)
- [31] 李雪飞. 两种乳杆菌比较基因组学研究及细菌素生物合成基因功能解析[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [32] 权旭. 蔷薇科桃亚属和杏属植物系统学研究[D]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2010.
- [33] QUAN X, ZHOU S L. Molecular identification of species in *Prunus* sect. *Persica* (Rosaceae), with emphasis on evaluation of candidate barcodes for plants[J]. Journal of Systematics and Evolution, 2011, 49(2):138-145.
- [34] GREINER S, WANG X, RAUWOLF U, et al. The complete nucleotide sequences of the five genetically distinct plastid genomes of oeno—thera, subsection oenothera; I. Sequence evaluation and plastome evolution [J] Nucleic Acids Research, 2008, 36(7):2366-2378.
- [35] QUANDT D, MULIER K, HUTTUNEN S. Characterization of the chloroplast DNA psbT H region and the influence of dyad symmetrical elements on phylogenetic reconstructions [J]. PlantBiology, 2003, 5(4):400-410.
- [36] 范航清, 王文卿. 中国红树林保育的若干重要问题[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2017, 56(3):323-330.
- [37] 张颖, 钟才荣, 杨勇, 等. 濒危红树植物红榄李种质资源挽救 [J]. 分子植物育种, 2018, 16(12):4112-4118.
ZHANG Y, ZHONG C R, YANG Y, et al. Rescue of germplasm resources of endangered mangrove plant *Lumnitzera littorea* [J]. Molecular Plant Breeding, 2018, 16 (12): 4112-4118. (in Chinese)
- [38] 姚宝琪, 刘强, 蔡梓, 等. 海南滨海木麻黄林下三种乡土树种的光合特性[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(12):92-101.
YAO B Q, LIU Q, CAI Z, et al. Photosynthetic characteristics of three native tree species in coastal *Casuarina equisetifolia* plantation in Hainan [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2011, 31 (12): 92-101. (in Chinese)
- [39] ZHOU Q J, CHEN Y M, WU W, et al. The complete chloroplast genome sequence of an endangered mangrove tree *Lumnitzera littorea* (Combretaceae)[J]. Conservation Genetics Resources, 2017(4):1-3.
- [40] 钟才荣, 林作武, 杨勇, 等. 海南岛红树林立地类型划分研究初探[J]. 分子植物种, 2018, 16(20):6875-6880.
ZHONG C R, LIN Z W, YANG Y, et al. Preliminary study on site classification of mangrove in hainan island [J]. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(20):6875-6880. (in Chinese)
- [41] YU T, HINSINGER D D, STRIJK J S, et al. The first complete chloroplast genome of a major mangrove species *Sonneratia alba* Sm. and its implications on conservation efforts [J]. Mitochondrial DNA Part B Resources, 2018, 3 (2) 500-502.
- [42] 殷从飞. 叶绿体 AtRabF1 蛋白耐盐胁迫和衰老及外吸收磷脂酰胆碱的机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [43] ZHANG T, FANG Y, WANG X, et al. The complete chloroplast and mitochondrial genome sequences of *Boea hygrometrica*: insight into the evolution of plant organellar genomes [J]. PLoS One, 2012, 7:30531.
- [44] ZHANG Y, ZHANG J W, YANG Y, et al. Complete chloroplast genome of *Pluchea indica* (L.) Less. (Asteraceae) and its phylogenetic analysis[J]. Mitochondria Dna Part, 2017, 2 (2):918-919.

青土湖干涸湖底 2 种典型固沙植物群落土壤粒径分布分形特征与养分关系研究

李易珺^{1,2},杨自辉^{1,2,3},郭树江^{1,2*},王强强^{1,2},王多泽^{1,2},王飞^{1,3}

(1. 甘肃省治沙研究所,甘肃 兰州 730070;2. 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;
3. 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)

摘要:以石羊河流域下游青土湖干涸湖底人工梭梭林和白刺灌丛沙包土壤为研究对象,通过分析 2 种植物群落 5 种立地条件土壤粒径分布和分形特征及其与土壤养分的关系,揭示了湖底 2 种典型植物群落土壤粒度的分布特征。结果表明:1)研究区固沙植被 0~10 cm 土壤颗粒以细砂粒为主,没有粗砂粒,其中白刺灌丛沙包表层极细砂含量、土壤颗粒物分形维数较梭梭林和对照区高。2)土壤颗粒分形维数与各粒级颗粒百分含量的关系差异较大,分形维数与黏粒、极细砂含量呈显著正相关,与细砂、中砂含量呈显著负相关,但是与粉粒含量关系不显著。土壤颗粒分形维数越大,土壤所含的细粒物质越多。3)土壤分形维数 D 值、黏粒、粉粒含量与有机质(SOM)、全 N(TN)呈正相关性,土壤颗粒物的分形维数越大、土壤黏粒、粉粒含量越高,则土壤有机质、全 N 含量越高。综合分析,固定白刺灌丛表层土壤沙化程度相对较低,其他类型风蚀严重,因此,应积极采取生物措施和工程措施开展生态修复防治风蚀和盐尘暴的发生。

关键词:青土湖;固沙植物;土壤粒径;分形特征;土壤养分

中图分类号:S158.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2020)05-0062-06

The Relationship between Fractal Characteristics of Soil Particle Size and Soil Nutrients of the Soils of Two Typical Sand-Fixing Plant Communities at the Bottom of the Qingtuhu Lake

LI Yi-jun^{1,2}, YANG Zi-hui^{1,2,3}, GUO Shu-jiang^{1,2*}, WANG Qiang-qiang^{1,2}, WANG Duo-ze^{1,2}, WANG Fei^{1,3}

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

2. Gansu Minqin National Studies Station for Desert Steppe Ecosystem, Minqin 733300, Gansu, China;

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

Abstract:In this paper, stand soils of two sand-fixing plant species, i. e., *Haloxylon ammodendron*, *Nitraria tangutorum* that were planted in the dried bottom of the Qingtu Lake in the lower reaches of Shiyang River basin were taken as research objects to study the distribution and fractal characteristics of soil particle size in five sites of two plant communities and their relationships with soil nutrients, as well as the distribution characteristics of soil particle size in two typical plant communities. The results showed that 1) in 0—10 cm soil layer, soil particles were mainly fine sand in the study area, accounting for 65.9%, without coarse sand, the content of extremely fine sand and fractal dimension D in the surface of the *N. tangutorum* were higher than *H. ammodendron* and the mobile sand dunes. 2) The relationship between soil fractal dimension and percentages of different grain sizes was significantly different. Fractal dimension presented significantly positive correlations ($P < 0.05$) with the contents of clay and extremely fine sand, and significantly negative correlations ($P < 0.05$) with the contents of fine and medium sand, but there was no

收稿日期:2018-04-24 修回日期:2020-03-03

基金项目:国家自然科学基金(31760238);国家青年科学基金(31700339)。

作者简介:李易珺。研究方向:荒漠化防治。E-mail:87057701@qq.com

* 通信作者:郭树江,副研究员。研究方向:荒漠生态。E-mail:shujguo@126.com

significant relationship with the content powdery particles. The larger the fractal dimension of soil particles, the more fine grains (clay and very fine sand) in the soil. 3) Fractal dimension value (D), soil clay and particle content were positively correlated with soil organic matter and total nitrogen. The higher the fractal dimension of soil particles, the higher the soil clay and particle contents, the higher the soil organic matter and total nitrogen contents. Based on the comprehensive analysis, the content of extremely fine sand and fractal dimension of *N. tangutorum* were high at the bottom of Qingtu Lake, which could reflect the serious wind erosion degree of the site type, so biological measures and engineering measures should be taken actively to prevent and control wind erosion and salt dust storm.

Key words: Qingtu Lake; sand-fixing plant; soil particle size; fractal characteristics; soil nutrient

青土湖是石羊河流域下游的尾闾湖泊,在 1959 年完全干涸后,湿地植被演化为盐碱化荒漠,成为新的沙尘暴起沙源^[1]。2010 年随着石羊河流域综合治理工程的实施,对青土湖进行人工生态输水,干涸 51 a 之久的青土湖形成了季节性水面,人工湿地逐步形成,对于调节区域气候、维持沙漠生态环境、保护生物多样性、减小盐碱沙尘对环境的污染、促进沙区经济发展和提高人民生活质量起到了重要意义。但由于上游来水量有限、蒸发强烈、入渗补给地下水等因素,湖底大部分区域被沙丘和盐碱风沙土覆盖,大面积区域发育形成了天然白刺灌丛,有部分区域人工栽植了梭梭,但是区域内主要风沙区植被覆盖度低,盐碱风沙危害依然严重,影响着周边农业生产、交通运输,制约当地经济社会的可持续发展^[2]。

干旱荒漠区天然植被最显著的特点是低覆盖度,且大多以斑块状、条带状、灌丛状格局呈现^[3],在植被稀少的干旱地区,灌木通过改造近地表气流使风沙流中的沙粒在其植株间和背风侧沉积,发挥着巨大的防风固沙作用^[4-5],而粒度分析是对沉积物分析的重要手段之一^[6]。地表沉积物的粒度特征及分形特征不仅可以反映风力对沙源物质的搬运和分选及沙源物质组成特征^[7],而且可结合地表气流、植被覆盖及地形特征进一步分析不同风沙地貌形成的原因及过程。因此对青土湖干涸湖底 2 种典型固沙植物群落土壤颗粒粒径分布及分形特征开展研究具有重要的科学意义,更为重要的是研究成果可为青土湖湿地生态保护与恢复提供科学依据,具有现实意义和实际价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青土湖位于石羊河流域下游,地理位置 $39^{\circ}05'N, 103^{\circ}31'E$, 海拔 $1\,292 \sim 1\,310\text{ m}$ 。该区域属于温带大陆性干旱荒漠气候,年平均气温 7.8°C , $>10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温 $3\,289.1^{\circ}\text{C}$; 年降水量 110 mm 左右, 蒸发量 $>2\,640\text{ mm}$; 无霜期 168 d , 光照 $3\,181\text{ h}$, 太阳辐射 $630\text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$; 全年盛行西北风,危害风向主

要为西北风,风力强劲,年均风速 $4.1\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。区域地形地貌为湖相沉积基质上相互交错分布流动、半固定、固定沙丘和丘间低地,沙丘高度 $3 \sim 10\text{ m}$ 。地带性土壤为灰棕漠土,非地带性土壤为草甸沼泽土和风沙土。植被类型为典型的荒漠植被,主要植被类型为唐古特白刺灌丛(*Nitraria tangutorum*)、人工梭梭林(*Haloxylon ammodendron*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)群落和芦苇群落(*Phragmites australis*),白刺沙堆呈斑块状分布,面积相对较大,芦苇群落主要分布在地下水位较浅的区域。草本植物有猪毛菜(*Salsola collina*)、驼蹄瓣(*Zygophyllum fabago*)、戟叶鹅绒藤(*Cynanchum sibiricum*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、砂蓝刺头(*Echinops gmelinii*)、蝶果虫实(*Corispermum patelliforme*)等。

1.2 试验设计

在青土湖选择 2 种典型固沙植物群落 5 种立地类型进行土壤样品采集(表 1)。5 种立地类型分别为固定白刺灌丛、流动白刺灌丛、半固定沙丘梭梭林、流动沙丘梭梭林、流动沙丘(对照)。每种类型中选 3 个土壤采集点,其中白刺灌丛每种类型选择白刺沙包 3 个,在每个沙包中上部分 3 个方向采集样品 3 个;人工梭梭林每种类型选择梭梭 3 株,在每棵梭梭林冠下分 3 个方向采集样品 3 个;流动沙丘在沙丘中上部分 3 个方向采集样品 3 个。土壤样品采集采用混合采样法,采集深度为表层 $0 \sim 2, 2 \sim 10\text{ cm}$,采集同一层次的土壤样品混合后将样品中的石块、植物残根等杂物挑取后装入无菌塑料袋,带回实验室风干、研磨、过筛等处理,以备土壤有机质、全 N、速效 P、全 K、速效 K、全盐、粒度和 pH 测定^[8]。土壤含水量采用烘干法,土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法;全 N 采用碱解扩散法;速效 P 采用钼锑抗比色法- $0.5\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 浸提法;全 K 采用原子吸收分光光度法;速效 K 采用原子吸收光谱法;全盐采用残渣烘干-质量法测定,pH 值的测定用电极法;土壤粒度由马尔文激光粒度分析仪(Master sizer 2000)测定,以美国制土壤粒径分级标

准输出:黏粒($<0.005\text{ mm}$)、粉粒($0.005\sim0.05\text{ mm}$)、极细砂($0.05\sim0.1\text{ mm}$)、细砂($0.1\sim0.25\text{ mm}$)、中砂($0.25\sim0.5\text{ mm}$)、粗砂($0.5\sim1\text{ mm}$)、极粗砂($1\sim2\text{ mm}$)^[9]。

表 1 样地基本情况

Table 1 The basic situations of sample land

序号	立地类型	主要植物种	植被 盖度/%	平均 高度/cm	结皮情况
1	固定白刺灌丛沙包	唐古特白刺、盐生草、猪毛菜、沙蓬、驼蹄瓣、芦苇	20.35	25.00	盐结皮完全覆盖
2	流动白刺灌丛沙包	唐古特白刺、黑果枸杞、盐爪爪、芦苇、盐生草、戟叶鹅绒藤	5.52	18.00	无结皮
3	流动沙丘梭梭林	梭梭、沙蓬、蝶果虫实、五星蒿、	16.98	107.00	无结皮
4	半固定沙丘梭梭林	梭梭、盐生草、猪毛菜	32.00	126.00	20%~30%被结皮覆盖
5	流动沙丘	无	/	/	无结皮

1.3 土壤粒度分形维数分析

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,公式如下^[10]:

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

式中: r 为粒径; 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} 为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^[11]。公式(1)两边取对数,由对数曲线的拟合斜率计算出 D 值。

2 结果与分析

2.1 固沙植被土壤粒度分布及其分形特征

由表 2 可知,2 种典型固沙植物群落土壤以细砂为主,占 65.9%。其中,半固定沙丘梭梭林、流动沙丘梭梭林和流动沙丘(对照)0~10 cm 深度的土壤均以细砂含量最多,占 81.8%;固定白刺灌丛沙包 0~2 cm 深度的土壤均以极细砂为主,2~10 cm 以细沙为主,流动白刺灌丛沙包 0~2 cm 深度的土

壤均以细砂为主,2~10 cm 深度粗粉粒相对较多。各粒级土壤颗粒百分含量单因素方差分析结果表明,5 种类型土壤的黏粒、粉粒、中砂含量差异不显著,极细砂、细砂差异分别呈现极显著($P < 0.01$)、显著($P < 0.05$),其中,固定白刺灌丛、流动白刺灌丛的极细砂含量显著($P < 0.05$)高于半固定沙丘梭梭林、流动沙丘梭梭林、流动沙丘(对照)。

分形维数可以反映粒径大小和分布的均匀程度,可用来表征不同土地利用类型的土壤粒度特征和沙漠化程度等^[12-15]。经方差分析,5 种立地类型土壤分形维数之间差异极显著($P < 0.01$),固定白刺灌丛沙包>流动白刺灌丛沙包>半固定沙丘梭梭林>流动沙丘梭梭林>流动沙丘(对照)。其中,白刺灌丛(固定、流动)、半固定沙丘梭梭林与流动沙丘梭梭林、流动沙丘(对照)差异显著($P < 0.05$),而流动沙丘梭梭林与流动沙丘(对照)差异显著($P < 0.05$)。5 种类型土壤颗粒分形维数随采样深度的变化特征看出(表 2),随着采样深度增加,土壤颗粒分形维数呈逐渐减小趋势。

表 2 青土湖典型固沙植物群落土壤粒度分布及其分形维数

Table 2 Characteristics of soil particles size distribution and fractal features in Qingtu Lake

序号	样地名称	深度 /cm	细黏粒	粗黏粒	细粉粒	粗粉粒	极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂	分形 维数	R^2
			/mm <0.001	/mm 0.001~ 0.005	/mm 0.005~ 0.01	/mm 0.01~ 0.05	/mm 0.05~ 0.1	/mm 0.1~ 0.25	/mm 0.25~ 0.5	/mm 0.5~ 1	/mm 1~2		
1	固定白刺灌丛沙包	0~2	0.831	4.862	3.362	15.969	38.808	36.168	0	0	0	2.210	0.848
		2~10	0.506	3.123	1.959	7.820	34.077	51.407	1.108	0	0	2.156	0.880
2	流动白刺灌丛沙包	0~2	0.438	2.417	1.454	3.448	33.844	58.207	0.191	0	0	2.178	0.938
		2~10	1.565	11.770	11.140	33.703	17.796	22.741	1.286	0	0	2.011	0.802
3	半固定沙丘梭梭林	0~2	0.314	1.522	0.735	2.039	3.443	80.632	11.316	0	0	2.157	0.932
		2~10	0.241	1.041	0.329	0	7.688	77.842	12.860	0	0	2.097	0.885
4	流动沙丘梭梭林	0~2	0.075	0.329	0.126	0	2.299	80.769	16.401	0	0	1.907	0.862
		2~10	0	0	0	0	3.808	82.073	14.119	0	0	1.668	0.510
5	流动沙丘(对照)	0~2	0	0	0	0	2.418	85.307	12.275	0	0	1.513	0.507
		2~10	0	0	0	0	2.105	84.337	13.558	0	0	1.456	0.511

2.2 典型固沙植物群落土壤分形维数与粒径分布的关系

土壤颗粒分形维数能定量表达土壤结构特征,指示土壤退化程度等一系列土壤特征^[16-17]。由表 3 可知,土壤颗粒分形维数与各粒级颗粒百分含量的关系差异较大,分形维数与黏粒、极细砂含量呈显著正相关($P < 0.05$),与细砂、中砂含量呈显著负相关($P < 0.05$),但是与粉粒含量关系不显著($P > 0.05$)。土壤粒径分形维数与黏粒含量相关性最好,其次是极细砂粒,说明土壤颗粒分形维数越大,土壤所含的细粒物质(黏粒和极细砂)越多,反之则小。分形维数能很好地反映土壤颗粒物质的损失状况,从而可用来反映各类土地的风蚀程度。

2.3 分形维数与土壤理化性质的关系

土壤理化性质各因子之间相互作用、相互影响,存在着不同程度的相关关系^[18]。通过对分形维数 D 值、颗粒物含量与土壤理化性质各因子相关性分析可知(表 4),分形维数 D 值与全 K(TK) 含量呈显著负相关($P < 0.05$),与有机质(SOM)、全 N(TN)、全 P(TP)、碱解 N(HN)、速效 K(AK) 呈正相关性,

但均未达到显著水平($P > 0.05$),与速效 P(AP) 呈负相关性,亦未达到显著水平($P > 0.05$)。土壤黏粒、粉粒含量与有机质(SOM)、全 N(TN) 呈极显著正相关($P < 0.01$),与全 K(TK) 呈极显著负相关($P < 0.01$)。土壤砂粒含量与有机质(SOM)、全 N(TN) 呈极显著负相关($P < 0.01$),与全 K(TK) 含量呈极显著正相关($P < 0.01$),与其他理化性质相关性均未达到显著性水平。

表 3 分形维数与粒径分布的相关关系

Table 3 Correlation relationship between soil particle size and fractal dimension

粒径分布/mm	拟合公式	相关系数	显著水平 P
<0.001	$D = 1.779 + 0.470d_1$	0.742	0.014
0.001~0.005	$D = 1.822 + 0.057d_2$	0.667	0.035
0.005~0.01	$D = 1.865 + 0.052d_3$	0.577	0.081
0.01~0.05	$D = 1.859 + 0.017d_4$	0.595	0.070
0.05~0.1	$D = 1.772 + 0.013d_5$	0.646	0.043
0.1~0.25	$D = 2.629 - 0.010d_6$	0.729	0.017
0.25~0.5	$D = 2.231 - 0.032d_7$	0.692	0.027
0.5~1	—	—	—
1~2	—	—	—

表 4 土壤颗粒组成和分形维数与土壤理化性质相关关系

Table 4 Correlation relationship between soil particles size distribution and fractal features and soil physical and chemical properties

	SOM	TN	TP	TK	HN	AP	AK
分形维数	0.568	0.553	0.121	-0.659 *	0.587	-0.561	0.511
黏粒	0.967 **	0.965 **	-0.273	-0.930 **	0.660 *	-0.279	0.520
粉粒	0.960 **	0.960 **	-0.339	-0.912 **	0.596	-0.232	0.447
砂粒	-0.963 **	-0.963 **	0.325	0.917 **	-0.611	0.243	-0.464

注: * 表示相关系数在 0.05 水平上显著; ** 表示相关系数在 0.01 水平上显著。

3 结论与讨论

通过对土壤颗粒分形维数与各粒级颗粒百分含量的相关分析表明,研究区 2 种典型固沙植物群落土壤颗粒分形维数越大,土壤所含的细粒物质(黏粒和极细砂)越多。这说明土壤颗粒分形维数随着土壤质地的粗细程度发生明显变化,土壤质地越细,分形维数越大。 D 值、土壤黏粒、粉粒含量与有机质、全 N 呈正相关性,土壤颗粒物的分形维数越大、土壤黏粒、粉粒含量越高,则土壤有机质、全 N 含量越高。而 D 值、土壤黏粒、粉粒含量与全 K 含量呈显著负相关。

湖底 2 种典型固沙植物群落 0~10 cm 土壤颗粒以细砂粒为主,占 65.9%,没有粗砂粒,固定白刺灌丛表层土壤分形维数最高,表层黏粒和极细砂含量较高,因为所选 2 种立地类型风沙土物质来源有差异,人工梭梭林群落土壤物质主要来源于巴丹吉林沙漠风沙土入侵湖底,而白刺灌丛沙包土壤来源

为湖底沉积物侵蚀运动形成,且固定白刺灌丛植被盖度高,防风固沙效能显著,表层沉积的细粒物质含量较高,在雨水的作用下形成了稳定的盐结皮。近年来随着石羊河流域综合治理工程的实施,青土湖内湿地面积逐年增加,但区域内的部分沙丘和白刺沙包仍处于流动状态,风沙危害依然存在。在青土湖生态治理过程中,在不断扩大湿地面积的同时,还需要在湖底主要风沙区开展人工工程措施和生物措施相结合的防沙治沙工程,不断改善流动沙丘和流动白刺灌丛沙包周围的小气候环境,使沙丘和沙包表面逐步形成稳定的沙结皮、盐结皮,减少起尘量,有效改善青土湖区域及周边大气环境。

土壤风蚀过程对土壤理化性状具有重要影响,而土壤粒度特征就是土壤在长期风蚀及风选作用下形成的产物^[19]。本研究表明,研究区典型固沙植物群落土壤颗粒以细砂为主,占 65.9%,其次是黏粒,没有粗砂粒,土壤的分形维数为 1.45~2.22。

在自然状态下,土壤粒度特征不仅对土壤理化

性质和生物学特性产生影响,且与植物生长的环境条件密切相关。当外界条件一致时,植被不仅影响风沙流结构,它的残留物和根系还会改变风成沙理化性质,增强沙粒粘结性,使土壤有更好的稳定结构,抗蚀性增强^[20-22]。相关研究表明,植被主要通过覆盖地表、分解风力及阻挡输沙来改变近地面流场,不同植被类型会导致沉积物组成产生差异^[23]。研究表明,白刺灌丛沙包对表层0~10 cm土壤的防护效应明显,其中固定白刺灌丛沙包表层形成有盐结皮,且植被盖度高,防风固沙效益明显。流动白刺灌丛沙包颗粒物分形维数虽然较高,但是灌丛沙化程度却很高,灌丛丘间地细小的颗粒物在风力的作用下被搬运至灌丛沙包表层堆积,因沙包植被稀少、盖度低,部分颗粒物不能固定在沙包上,在强风的作用下还能够吹散到空气中,污染大气环境。梭梭作为一种在荒漠生境条件下生长的植物类型,长期的适应结果使其产生了特殊的适应策略,具有抗风蚀沙割、耐干旱贫瘠、耐沙埋等一系列特性,形成了特定的构型特征^[24]。研究表明人工梭梭在该研究区风沙防治中起着至关重要的作用,特别是半固定沙丘梭梭林生长旺盛、枝条茂密、植被盖度高,能够有效降低风速,拦截近地表运动中的细沙粒,使其沉积;而流动沙丘梭梭林植被盖度、植被平均高度、密度较半固定沙丘梭梭林均要低,则造成流动沙丘梭梭林对极细沙颗粒物的沉积能力低于半固定沙丘梭梭林。

研究还表明,土壤颗粒分形维数与各粒级颗粒百分含量的关系差异较大,分形维数与黏粒、极细砂含量呈显著正相关($P<0.05$),与细砂、中砂含量呈显著负相关($P<0.05$),但是与粉粒含量关系不显著($P>0.05$)。土壤粒径分形维数与黏粒含量相关性最好,其次是极细砂粒,这就说明土壤颗粒分形维数越大,土壤所含的细粒物质(黏粒和极细砂)越多,反之则小。前人在其他研究中得到的结果与本研究的结果相一致^[25-26]。分形维数能很好地反映土壤颗粒物质的损失状况,从而可用来反映各类土地的风蚀程度,分形维数随着沙化程度增加而降低^[10,27],而本研究中固定白刺灌丛沙包土壤分形维数最高,说明沙化程度相对较低,其他类型风蚀严重,因此,应积极采取生物措施和工程措施进行综合治理,减少盐尘天气的发生。

本研究中,土壤颗粒物D值与全K(TK)含量呈显著负相关($P<0.05$),与有机质、全N、全P、碱解N、速效K呈正相关性,但均未达到显著水平($P>0.05$),与速效P呈负相关性,亦未达到显著水平($P>0.05$)。土壤黏粒、粉粒含量与有机质、全N

呈极显著正相关($P<0.01$),与全K呈极显著负相关($P<0.01$)。土壤砂粒含量与有机质、全N呈极显著负相关($P<0.01$),与全K含量呈极显著正相关($P<0.01$),与其他理化性质相关性均未达到显著性水平。说明了土壤的颗粒物含量、分形维数与土壤养分之间存在显著相关关系,土壤粒径分形维数可以用来反映土壤肥力状况^[27]。

参考文献:

- [1] 冯绳武.民勤绿洲的水系演变[J].地理学报,1963,29(3):241-249.
- [2] 郭树江,杨自辉,王多泽,等.石羊河流域下游青土湖近地层风尘分布特征[J].干旱区地理,2016,39(6):1255-2162.
GUO S J, YANG Z H, WANG D Z, et al. Dust distribution characteristics of Qingtu Lake surface layer at downstream Shiyang River[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(6): 1255-2162. (in Chinese)
- [3] 胡广录,赵文智,王岗.干旱荒漠区斑块状植被空间格局及其防沙效应研究进展.[J]生态学报,2011,31(24),7609-7616.
HU G L, ZHAO W Z, WANG G. Reviews on spatial pattern and sand-binding effect of patch vegetation in arid desert area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(24): 7609-7616. (in Chinese)
- [4] 杨婷婷,姚国征,王满才,等.乌兰布和沙漠天然灌丛防风阻沙效益研究[J].干旱区资源与环境,2008,22(1):194-197.
YANG T T, YAO G Z, WANG M C, et al. Study on wind-sand defending effect of natural shrubs in Ulanbu Dsert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(1): 194-197. (in Chinese)
- [5] 徐秀芸,张进虎,朱国庆,等.沙冬青与几种常见物种的防风阻沙效能定量研究[J].中国农学通报,2011,27(4):21-25.
XU X Y, ZHANG J H, ZHU G Q, et al. Quantitative research on wind and sand performance of *Ammopiptanthus* and several common shrubs[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(4): 21-25. (in Chinese)
- [6] 钱广强,董治宝,罗万银,等.巴丹吉林沙漠地表沉积物粒度特征及区域差异[J].中国沙漠,2011,31(6):1357-1364.
QIAN G Q, DONG Z B, LUO W Y, et al. Grain size characteristics and spatial variation of surface sediments in the Badain Jaran Desert[J]. Journal of Cesert Research, 2011, 31(6): 1357-1364. (in Chinese)
- [7] 马倩,武胜利,刘永泉,等.艾比湖流域抛物线沙丘表层沉积物粒度特征[J].中国沙漠,2014,34(3):650-657.
MA Q, WU S L, LIU Y Q, et al. Grain size distribution of the parabolic dunes' sediments in the Ebinur Lake basin, Xinjiang, China[J]. Journal of Cesert Research, 2014, 34(3): 650-657. (in Chinese)
- [8] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:29-137.
- [9] 邓继峰,丁国栋,李景浩,等.基于3种不同土壤粒径分级制度的毛乌素沙地樟子松林地土壤体积分形维数差导师研究[J].西北林学院学报,2017,32(3):35-40.
DENG J F, DING G D, LI J H, et al. Effects of three soil parti-

- cle size classification system on calculating volume-based fractal dimension of mongolian pine plantations in Mu Us Desert [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(3): 35-40. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] WANG D, FU B J, ZHAO W W, et al. Multifracttal characteristics of soil particle size distribution under different land-use types on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2008, 72: 39-36.
- [12] 赵文智, 刘志民, 程国栋. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征 [J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 877-881.
- ZHAO W Z, LIU Z M, CHENG G D. Fractal dimension of soil particle for sand desertification [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(6): 877-881. (in Chinese)
- [13] 文海燕, 傅华, 赵哈林. 退化沙质草地开垦和围封过程中的土壤颗粒分形特征 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 55-59.
- WEN H Y, FU H, ZHAO H L. Fractal features of soil particle size distribution in degraded sandy grassland during reclamation and enclosure [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(1): 55-59. (in Chinese)
- [14] 齐雁冰, 常庆瑞, 惠浹河. 人工植被恢复荒漠化逆转过程中土壤颗粒分形特征 [J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 566-569.
- QI Y B, CHANG Q R, HUI Y H. Fractal features of soil particles in desertification reversing process by artificial vegetation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 566-569. (in Chinese)
- [15] 高君亮, 李玉宝, 虞毅, 等. 毛乌素沙地不同土地利用类型土壤分形特征 [J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 220-223.
- GAO J L, LI Y B, YU Y, et al. Soil fractal characters under different land use patterns of mu us sandy land [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(6): 220-223. (in Chinese)
- [16] 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, 28(3): 120-125. (in Chinese)
- [17] 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.
- GUAN X Y, YANG P L, LÜ Y. Relationships between soil particle size distribution and soil physical properties based on multifractal [J]. Transactions of the Chinese Society For Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 44-50. (in Chinese)
- [18] 黄雅茹, 郝玉光, 董礼隆, 等. 乌兰布和沙漠东北缘典型固沙林土壤养分特征研究 [J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 1-9.
- HUANG Y R, HAO Y G, DONG L L, et al. Comparative study on soil chemical properties of typical sand-fixing forests in Ulanbu Deser [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(2): 1-9. (in Chinese)
- [19] 张继义, 王娟, 赵哈林. 沙地植被恢复过程土壤颗粒组成变化及其空间变异特征 [J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 153-157.
- ZHANG J Y, WANG J, ZHAO H L. Changes in soil particles fraction and its spatial variation characteristics in restoration processes of sandy desertification land [J]. Journal of Soil and Water conservation, 2009, 23(3): 153-157. (in Chinese)
- [20] 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.
- [21] 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)
- [22] LANGFORD R P. Nabkha (coppice dune) fields of south-central New Mexico, U. S. A. [J]. Journal of Arid Environment, 2000, 46: 25-41.
- [23] 刘小平, 董治宝. 直立植被粗糙度和阻力分解的风洞试验研究 [J]. 中国沙漠, 2002, 22(1): 82-87.
- LIU X P, DONG Z B. Wind tunnel tests of the roughness and drag partition on vegetated surfaces [J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(1): 82-87. (in Chinese)
- [24] 屈志强, 刘连友, 吕艳丽. 沙生植物构型及其与抗风蚀能力关系研究综述 [J]. 生态学杂志, 2011, 30(2): 357-362.
- QU Z Q, LIU L Y, LÜ Y L. Psammophyte architecture and its relations with anti-wind erosion capability: a review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(2): 357-362. (in Chinese)
- [25] 郑子成, 何淑勤, 王永东, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体中养分的分布特征 [J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 170-174.
- ZHENG Z C, HE S Q, WANG Y D, et al. Distribution feature of soil nutrients in aggregate under different land use [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(3): 170-174. (in Chinese)
- [26] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征 [J]. 地理研究, 2002, 21(6): 700-706.
- DING W F, DING D S. The fractal features of soil granule structure before and after vegetation destruction on Loess Plateau [J]. Geographical Research, 2002, 21(6): 700-706. (in Chinese)
- [27] WU C Z, HOONG W. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns [J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(2): 162-167.