

腾格里沙漠两种白刺生境土壤粒度和养分的评价

赵龙飞¹, 秦富仓^{1,2}, 董晓宇¹, 赵恺¹, 董菲菲¹, 马慧³, 弥宏卓⁴, 王志强⁴

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古自治区林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 3. 内蒙古自治区水利科学

研究院, 内蒙古 呼和浩特 010052; 4. 内蒙古自治区林业和草原监测规划院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: [目的] 探究不同生境下灌丛土壤结构与养分的差异性, 为沙漠地区综合治理及植被营建工作提供科学参考。[方法] 选取腾格里沙漠东部沙地、盐碱地两种生境下白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛沙堆为研究对象, 对其土壤粒径组成及土壤养分含量进行分析。[结果] ①沙地、盐碱地白刺灌丛沙堆土壤粒径均以细砂为主, 分别占总含量的55.03%~74.21%, 44.71%~72.83%, 土壤分选性均极好; ②白刺灌丛沙堆在盐碱地(1.86~2.32)土壤分形维数显著高于沙地(1.62~1.72)。分形维数从白刺灌丛沙堆顶部到坡脚均呈现出减小的趋势, 而随着土层深度的增加同样呈现减小的趋势。③盐碱地白刺灌丛沙堆土壤全氮(TN)(3.35~4.24 g/kg)、全磷(TP)(0.11~0.26 g/kg)、全钾(TK)(0.44~0.65 g/kg)显著高于沙地白刺灌丛沙堆土壤TN(1.48~3.43 g/kg)、TP(0.10~0.22 g/kg)、TK(0.30~0.61 g/kg)含量, 且与细颗粒含量呈正相关性, 与粗颗粒含量呈负相关。[结论] 白刺灌丛对土壤环境的适应与改良能力在不同生境下具有不同的表现形式, 沙地与盐碱地生境下白刺灌丛土壤颗粒组成与土壤养分含量存在相关性, 因此可以通过增加土壤细颗粒含量改善土壤养分条件。

关键词: 白刺灌丛沙堆; 土壤粒径; 养分特征; 分形维数

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)03-0213-11

中图分类号: S153, P931.3

文献参数: 赵龙飞, 秦富仓, 董晓宇, 等. 腾格里沙漠两种白刺生境土壤粒度和养分的评价[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 213-223. Zhao Longfei, Qin Fucang, Dong Xiaoyu, et al. Assessing soil particle size and nutrients of two *Nitraria tangutorum* nebkha habitats in Tengger Desert[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 213-223. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.005; CSTR:32312.14.stbctb.2025.03.005.

Assessing soil particle size and nutrients of two *Nitraria tangutorum* nebkha habitats in Tengger Desert

Zhao Longfei¹, Qin Fucang^{1,2}, Dong Xiaoyu¹,

Zhao Kai¹, Dong Feifei¹, Ma Hui³, Mi Hongzhuo⁴, Wang Zhiqiang⁴

(1. College of Desert Control Science And Engineering, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Inner Mongolia Academy of Forestry

Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Water

Conservancy Science Research Institute, Hohhot, Inner Mongolia 010052, China; 4. Inner Mongolia

Autonomous Region Forestry and Grassland Monitoring and Planning Institute, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

Abstract: [Objective] The differences in soil structure and nutrients in shrublands in different habitats were explored to provide a reference for management and ecosystem restoration in desert areas. [Methods] *Nitraria tangutorum* nebkhas in sandy and saline-alkali land in the eastern Tengger Desert were selected as research subjects. Soil particle size composition and soil nutrient content were analyzed. [Results] ① The soil particle size of *N. tangutorum* nebkhas in sandy land and saline-alkali land was mainly fine sand, accounting for 55.03%—74.21% and 44.71%—72.83% of the total content, respectively. Soil sorting was excellent in both habitats. ② The soil

收稿日期: 2024-11-20

修回日期: 2025-01-17

采用日期: 2025-01-19

资助项目: 内蒙古自治区科技创新重大示范工程“揭榜挂帅”项目“腾格里沙漠锁边林分结构优化调控技术研究”(2024JBG0021-4-2); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2024QN03062); 内蒙古退耕还林工程生态化学计量特征研究项目(ZB2023020802)

第一作者: 赵龙飞(2000—), 男(汉族), 河南省宜阳县人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: zhaolongfei1012@163.com。

通信作者: 秦富仓(1966—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持方面研究。Email: Qinfc@126.com。

fractal dimension of *N. tangutorum* nebkhas in saline-alkali land (1.86—2.32) was significantly higher than that in sandy land (1.62—1.72). The fractal dimension shows a decreasing trend from the top of the *Nitraria tangutorum* nebkhas to the foot of the slope, and also shows a decreasing trend with the increase of soil depth. ③ The contents of TN (3.35—4.24 g/kg), TP (0.11—0.26 g/kg) and TK (0.44—0.65 g/kg) in the soil of *N. tangutorum* nebkhas in saline-alkali land were significantly higher than those in the soil of *N. tangutorum* nebkhas in sandy land (1.48—3.43 g/kg), TP (0.10—0.22 g/kg) and TK (0.30—0.61 g/kg). It is positively correlated with the content of fine particles and negatively correlated with the content of coarse particles. [Conclusion] The adaptability and improvement capacity of *N. tangutorum* shrubs in soil environments vary in different habitats. There was a correlation between soil particle composition and nutrient content in *N. tangutorum* shrub mounds in sandy and saline-alkali lands. Increasing the content of fine soil particles can help improve soil nutrient conditions.

Keywords: *Nitraria tangutorum* nebkhas; soil particle size; nutrient characteristics; fractal dimension

腾格里沙漠位于中国西北部,是中国第四大沙漠^[1],横跨内蒙古、宁夏和甘肃部分地区。该区域气候干旱、降水稀少、风沙活动频繁^[2],使得腾格里沙漠土壤结构疏松、养分贫瘠。土壤作为植被生长的基础,其粒径分布(particle size distribution, PSD)特征决定了土壤质地结构和理化性质^[3],可作为水土保持、养分状况、作物生长等的评价指标^[4]。在风沙环境中,土壤粒径的大小和分布情况更是反映风沙环境变化、沙丘活动性等动态地貌过程的关键因素^[5]。因此,对于土壤粒径特征的研究,不仅有助于揭示土壤的物理特性,还能够为风沙活动监测及生态修复提供科学依据。

白刺(*Nitraria tangutorum*)作为腾格里沙漠重要的建群种,不仅能适应干旱和盐碱环境,还具备改善土壤结构、积累养分和减少风蚀等生态功能,在防风固沙和植被恢复中发挥着重要作用^[6]。风沙流遇到白刺灌丛阻拦后,沙物质在白刺灌丛及周围堆积形成的生物地貌称为白刺灌丛沙堆,其形成和发育是群落演替过程中植被与环境相互作用的结果,在流沙的固定和维持生态系统稳定方面发挥着重要作用^[7]。腾格里沙漠,因其地貌、土壤类型、含盐量等自然因素的差异,白刺多以灌丛沙堆的形式分布在沙地和盐碱地两种典型的生态环境中。其中,沙地土壤粒径相对较大,土壤的透气性较强^[8];而盐碱地土壤粒径相对较小,土壤结构细腻。土壤的粒径组成和养分含量作为影响土壤质量的重要指标,深刻影响着植被的分布和生长情况。目前,多数学者对于土壤粒径及养分已开展了大量研究,贺俊^[9]对毛乌素沙地樟子松人工林土壤粒径研究发现,土壤全氮、全磷和土壤有机质含量与分形维数间呈正相关关系。孙忠超等^[10]对宁夏回族自治区东部荒漠草原向灌丛地人为转变过程土壤粒径分析发现,土壤分形维数

与黏粒含量、粉粒含量、土壤全磷含量均呈显著正相关关系($p < 0.05$),但与砂粒含量呈显著负相关关系($p < 0.05$)。邓继峰等^[11]对辽东山区5种林分土壤颗粒研究发现,分形维数与黏粒和粉粒体积分数及土壤理化性质呈显著正相关关系。而对于白刺灌丛,已有相关学者^[12-13]从演替阶段、形态特征和空间分布等方面开展研究。然而,对于不同生境下白刺灌丛沙堆土壤粒径和养分特征的差异研究较为缺乏。因此,针对腾格里沙漠沙地与盐碱地白刺灌丛沙堆土壤粒径和养分特征开展研究,对理解白刺在不同生境下的适应性及对于土壤改良具有重要参考意义。为此,本研究以腾格里沙漠沙地和盐碱地白刺灌丛沙堆为研究对象,通过对其土壤粒径组成、全氮、全磷、全钾等养分特征的分析,探讨不同生境条件下白刺灌丛沙堆对土壤特征的影响。研究结果将有助于揭示白刺在干旱和盐碱生境下的土壤改良作用,为沙漠生态恢复提供科学依据,并为干旱区土壤改良和植被恢复实践提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国第4大沙漠——腾格里沙漠东部区域,海拔1 200~1 300 m。该地区属于温带大陆性气候,冬季干燥寒冷,降水主要集中在7—10月,年平均降水量71.44~116.60 mm,蒸发量远大于降水量,年平均蒸发量高达2 900~3 300 mm。年平均气温8.2℃,1月平均最低气温-25.2℃,7月平均最高气温23℃。年平均风速范围为2.48~2.79 m/s。土壤类型为风沙土^[14]。植被类型为沙漠植被,主要植被有白刺、油蒿(*Artemisia ordosica*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、驼绒藜(*Ceratoides arborescens*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)等。

1.2 样品采集和测定

1.2.1 样品采集 于 2024 年 8 月,选择腾格里沙漠东部沙地和盐碱地两种生境下的白刺灌丛沙堆作为研究对象。以白刺灌丛沙堆微地貌为单元,随机选取沙地和盐碱地大小相近的白刺灌丛沙堆各 5 个,在沙堆迎风坡坡脚、迎风坡中部、沙堆顶部、背风坡中部和背风坡坡脚 5 个位置进行取样。取样深度为 20 cm,分 3 层(0—5 cm, 5—10 cm, 10—20 cm)进行取样。共取得 150 个样品,将土壤样品带回实验室,阴干后过 2 mm 筛去除植物枯落物等杂质。

1.2.2 样品指标测定 过筛后的土壤粒径采用马尔文 3000 激光粒度分析仪测定,粒度分级采用美国制标准,具体为黏粒(<2 μm)、粉粒(2~50 μm)、极细砂粒(50~100 μm)、细砂粒(100~250 μm)、中砂粒(250~500 μm)、粗砂粒(500~1 000 μm)、极粗砂粒(1 000~2 000 μm)。全氮(TN)测定采用凯氏定氮法测定;全磷(TP)、全钾(TK)测定采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法;pH 值采用 pH 计测定。

1.3 数据处理方法

1.3.1 分形维数的计算 以激光粒度分析仪所获得粒径体积数据为基础,根据土壤粒径体积数据进行分形维数的计算,计算公式为^[10]:

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

式中: $V(r < R_i)$ 为土壤粒径小于 R_i 的颗粒累计体积分数; r 为土壤粒径(μm); V_T 为沉积物颗粒的总体积; R_{\max} 为土壤颗粒尺寸的最大值; D 为最终得到土壤颗粒分形维数。

1.3.2 粒度参数计算 采用 Folk-Word 图解法计算土壤颗粒的平均粒径、标准偏差、偏度值和峰态值^[15],计算公式为:

$$\varphi = -\log_2 d \quad (2)$$

$$d_0 = \frac{(\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84})}{3} \quad (3)$$

$$\sigma_0 = \left(\frac{\varphi_{84} - \varphi_{16}}{4}\right) + \left(\frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{6.6}\right) \quad (4)$$

$$SK = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{84} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{84} - \varphi_{16})} + \frac{\varphi_5 + \varphi_{95} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{95} - \varphi_5)} \quad (5)$$

$$K_g = \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{2.44(\varphi_{75} - \varphi_{25})} \quad (6)$$

式中: φ 值为土壤颗粒直径经过负对数变换后的值, $\varphi_5, \varphi_{16}, \varphi_{25}, \varphi_{50}, \varphi_{75}, \varphi_{84}, \varphi_{95}$ 分别为累计频率为 5%, 16%, 25%, 50%, 75%, 84%, 95% 时所对应的 φ 值; d_0 为平均粒径; σ_0 为标准偏差; SK 为偏度值; K_g 为峰态值。数据描述意义详见表 1。

表 1 土壤粒径参数分级范围
Table 1 Grading range of soil particle size parameters

标准偏差 σ_0		偏度值 SK		峰态值 K_g	
取值范围	分选级别	取值范围	偏度等级	取值范围	峰态等级
$\sigma_0 \leq 0.35$	分选极好	$-1.0 \leq SK < -0.3$	极负偏	$K_g \leq 0.67$	很宽平
$0.35 < \sigma_0 \leq 0.50$	分选好	$-0.3 \leq SK < -0.1$	负偏	$0.67 < K_g \leq 0.90$	宽平
$0.50 < \sigma_0 \leq 0.71$	分选较好	$-0.1 \leq SK < 0.1$	近于对称	$0.90 < K_g \leq 1.11$	中等
$0.71 < \sigma_0 \leq 1.00$	分选中等	$0.1 \leq SK < 0.3$	正偏	$1.11 < K_g \leq 1.56$	尖窄
$1.00 < \sigma_0 \leq 2.00$	分选较差	$0.3 \leq SK < 1.0$	极正偏	$1.56 < K_g \leq 3.00$	很尖窄
$2.00 < \sigma_0 \leq 4.00$	分选差			$K_g > 3.00$	极尖窄
$\sigma_0 > 4.00$	分选极差				

1.4 数据处理

分形维数和粒度参数计算在 Microsoft Excel 2019 中完成,土壤分布频率曲线、主成分分析图采用 Origin 2022 软件进行处理,采用 SPSS 22 软件中 one-way ANOVA 进行单因素的方差分析以及 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 白刺灌丛沙堆土壤粒度组成特征

通过土壤粒度分析,白刺灌丛沙堆土壤最大粒径

为粗砂,极粗砂含量为零。由表 2 可知,白刺灌丛沙堆不同位置 0—20 cm 土壤颗粒组成均以砂粒为主,具有显著性差异($p < 0.05$)。两种生境下,白刺灌丛沙堆顶部细砂含量均为最高。从灌丛沙堆顶部到(迎风坡、背风坡)坡中、(迎风坡、背风坡)坡脚过程中土壤细砂、细颗粒(极细砂和黏粉粒)含量均呈现减小趋势,而中砂和粗砂含量则呈现出增大的趋势。在两种生境下,沙地土壤砂粒含量为 55.03%~74.21%,其中细砂(55.03%~74.21%)和中砂(19.84%~41.13%)含量最高,而粗砂(0.08%~2.12%)和黏粉

粒(0.38%~1.12%)含量最少,远低于细砂和中砂含量;盐碱地土壤砂粒含量为44.71%~72.83%,土壤颗粒以细砂(44.71%~72.83%)为主,其次为极细砂(3.40%~17.88%)和中砂(4.48%~33.05%),而粗砂

(0%~0.28%)和黏粒(0.08%~1.18%)含量最少。整体上,白刺灌丛沙堆土壤颗粒均以细砂(100~250 μm)为主,盐碱地土壤颗粒在250~1 000 μm含量低于沙地;在0~100 μm含量高于沙地。

表 2 白刺灌丛沙堆土壤粒度组成

Table 2 Soil particle size composition of *Nitraria tangutorum* nebkhas

生境	采样位置	土层深度/cm	黏粒/% (0~2 μm)	粉粒/% (2~50 μm)	砂粒含量/%			
					极细砂 (50~100 μm)	细砂 (100~250 μm)	中砂 (250~500 μm)	粗砂 (500~1 000 μm)
沙地	迎风坡坡脚	0—5	0.06±0.01 ^{Aa}	0.51±0.41 ^{Ad}	1.77±1.87 ^{Ac}	55.91±6.13 ^{Bb}	39.72±7.67 ^{Aa}	2.03±0.73 ^{Aa}
		5—10	0.06±0.02 ^{Aa}	0.32±0.07 ^{Ad}	1.49±0.15 ^{Ae}	56.47±1.22 ^{Bd}	39.79±1.14 ^{Aa}	1.87±0.24 ^{Aa}
		10—20	0.06±0.02 ^{Aa}	0.40±0.10 ^{Ac}	2.46±0.24 ^{Ac}	60.95±1.11 ^{Ac}	34.98±1.14 ^{Ab}	1.14±0.21 ^{Bb}
	迎风坡坡中	0—5	0.07±0.02 ^{Aa}	1.05±0.15 ^{Ab}	5.54±0.16 ^{Aa}	72.42±0.28 ^{Aa}	20.81±0.52 ^{Cb}	0.10±0.01 ^{Cb}
		5—10	0.06±0.02 ^{Aa}	0.49±0.13 ^{Bc}	3.16±0.09 ^{Bd}	68.94±0.51 ^{Bc}	27.08±0.59 ^{Bb}	0.27±0.03 ^{Bb}
		10—20	0.06±0.02 ^{Aa}	0.35±0.06 ^{Cc}	1.31±0.10 ^{Cd}	55.03±1.15 ^{Cd}	41.13±1.04 ^{Aa}	2.12±0.24 ^{Aa}
沙地	沙堆顶部	0—5	0.06±0.01 ^{Aa}	1.47±0.25 ^{Aa}	4.18±0.26 ^{Cb}	69.97±0.96 ^{Ca}	24.13±1.18 ^{Ab}	0.19±0.04 ^{Ab}
		5—10	0.06±0.02 ^{Aa}	0.69±0.13 ^{Bb}	5.12±0.19 ^{Aa}	74.21±0.50 ^{Aa}	19.84±0.67 ^{Cd}	0.08±0.01 ^{Bc}
		10—20	0.05±0.02 ^{Aa}	0.70±0.12 ^{Ba}	4.72±0.14 ^{Ba}	72.85±0.39 ^{Ba}	21.58±0.51 ^{Bd}	0.11±0.01 ^{Bc}
	背风坡坡中	0—5	0.06±0.02 ^{Aa}	1.06±0.24 ^{Ab}	6.01±0.48 ^{Aa}	72.62±0.44 ^{Aa}	20.15±1.04 ^{Bb}	0.09±0.02 ^{Cb}
		5—10	0.05±0.02 ^{Aa}	0.40±0.11 ^{Bcd}	3.56±0.06 ^{Bc}	68.89±0.48 ^{Cc}	26.82±0.47 ^{Ab}	0.28±0.02 ^{Ab}
		10—20	0.05±0.02 ^{Aa}	0.36±0.07 ^{Bc}	3.22±0.14 ^{Cb}	70.14±0.59 ^{Bb}	26.01±0.68 ^{Ac}	0.21±0.03 ^{Bc}
背风坡坡脚	0—5	0.06±0.03 ^{Aa}	0.64±0.13 ^{Bc}	5.19±0.14 ^{Aa}	71.92±0.95 ^{Aa}	22.04±1.10 ^{Bb}	0.14±0.04 ^{Bb}	
	5—10	0.06±0.02 ^{Aa}	0.94±0.22 ^{Aa}	4.82±0.23 ^{Bb}	72.39±0.79 ^{Ab}	21.68±0.85 ^{Bc}	0.11±0.02 ^{Bc}	
	10—20	0.05±0.02 ^{Aa}	0.55±0.15 ^{Bb}	3.34±0.14 ^{Cb}	69.96±0.92 ^{Bb}	25.87±0.93 ^{Ac}	0.22±0.04 ^{Ac}	
盐碱地	迎风坡坡脚	0—5	0.19±0.10 ^{Bc}	2.64±0.21 ^{Cd}	6.41±0.59 ^{Cc}	70.94±1.44 ^{Aa}	19.70±1.90 ^{Aa}	0.12±0.04 ^{Ba}
		5—10	0.13±0.06 ^{Bb}	14.29±2.05 ^{Bb}	9.01±0.61 ^{Bd}	57.20±1.68 ^{Bc}	19.17±1.29 ^{Ab}	0.19±0.07 ^{Ab}
		10—20	1.03±0.40 ^{Aa}	36.79±1.28 ^{Aa}	11.87±1.90 ^{Ac}	44.71±1.94 ^{Ce}	5.60±0.46 ^{Bc}	0±0 ^{Cb}
	迎风坡坡中	0—5	0.57±0.13 ^{Aa}	10.82±0.99 ^{Ad}	17.05±0.52 ^{Ba}	67.08±0.81 ^{ABc}	4.48±0.28 ^{Ac}	0±0 ^{Bb}
		5—10	0.48±0.12 ^{Aa}	11.24±0.92 ^{Ac}	17.11±0.48 ^{Ba}	66.52±1.16 ^{Bb}	4.66±0.24 ^{Ad}	0±0 ^{Bc}
		10—20	0.23±0.06 ^{Bb}	9.67±0.62 ^{Bc}	17.88±0.62 ^{Aa}	67.46±0.75 ^{Ab}	4.75±0.33 ^{Ac}	0.01±0 ^{Ab}
盐碱地	沙堆顶部	0—5	0.43±0.09 ^{Ba}	8.89±0.92 ^{Aa}	16.43±1.10 ^{Aa}	69.09±1.20 ^{Bb}	5.15±0.61 ^{Cc}	0.01±0 ^{Ab}
		5—10	0.42±0.09 ^{Aa}	7.34±0.56 ^{Bd}	15.34±0.67 ^{Bb}	69.94±0.44 ^{Ba}	6.95±0.71 ^{Bc}	0±0 ^{Ac}
		10—20	0.32±0.08 ^{Bb}	5.47±0.48 ^{Cd}	13.71±0.34 ^{Cb}	72.83±0.33 ^{Aa}	7.67±0.39 ^{Ab}	0±0 ^{Ab}
	背风坡坡中	0—5	0.34±0.09 ^{Ba}	6.91±0.98 ^{Bb}	10.91±1.17 ^{Ab}	69.24±0.61 ^{Ab}	12.58±2.15 ^{Cb}	0.03±0.02 ^{Cb}
		5—10	0.09±0.03 ^{Bb}	5.19±1.35 ^{Be}	3.40±0.40 ^{Ce}	57.09±2.88 ^{Cc}	33.05±1.57 ^{Aa}	1.18±0.25 ^{Aa}
		10—20	0.08±0.03 ^{Bb}	9.58±2.28 ^{Ac}	5.02±0.70 ^{Be}	61.18±3.00 ^{Bc}	23.86±1.02 ^{Ba}	0.28±0.07 ^{Ba}
背风坡坡脚	0—5	0.14±0.04 ^{Bc}	3.57±0.45 ^{Bc}	7.29±0.54 ^{Cc}	69.36±1.66 ^{Ab}	19.50±2.24 ^{Aa}	0.13±0.07 ^{Aa}	
	5—10	0.15±0.07 ^{Bb}	34.99±1.87 ^{Aa}	12.04±1.82 ^{Ac}	46.15±2.26 ^{Cd}	6.66±0.81 ^{Be}	0.01±0 ^{Bc}	
	10—20	1.18±0.46 ^{Aa}	32.13±5.70 ^{Ab}	9.20±1.79 ^{Bd}	50.66±5.19 ^{Bd}	6.82±1.32 ^{Bb}	0±0 ^{Bb}	

注:大写字母表示同一生境同一位置不同土层差异显著($p<0.05$);小写字母同一生境同一土层不同位置差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 白刺灌丛沙堆土壤粒度参数与分形维数

由表 3 可知,沙地土壤平均粒径处于 2.06~2.42 φ (196.74~253.24 μm),属于细砂和中砂;盐碱地土壤

平均粒径处于 2.23~3.91 φ (105.08~228.80 μm),属于细砂。在沙地,白刺灌丛沙堆土壤平均粒径从沙堆顶部到坡脚过程中呈现增大趋势,而在盐碱地则

呈现出减小的趋势。且在灌丛沙堆不同部位不同土层深度,盐碱地土壤平均粒径值均小于沙地土壤平均粒径。沙地和盐碱地土壤颗粒标准偏差分别处于 $-0.60\sim-0.55$, $-1.95\sim-0.62$,沙地土壤分选系数高于盐碱地,分选级别均为极好。沙地土壤颗粒处于负偏和近于对称($-0.16\sim0.06$)、盐碱地土壤颗粒处于极负偏和近于对称($-0.59\sim-0.07$)。峰态值范围盐碱地远大于沙地,分别为 $0.83\sim2.23$, $0.95\sim1.01$,沙地峰度中等,而盐碱地则处于宽平至很尖窄。

白刺灌丛沙堆沙地土壤分形维数位于 $1.62\sim1.72$,盐碱地土壤分形维数位于 $1.86\sim2.32$,白刺在盐碱地土壤分形维数显著高于沙地。在不同土层深度,沙地和盐碱地白刺沙堆(迎风坡、背风坡)中部和顶部位置随着土层深度的增加土壤分形维数均在减小。在白刺沙堆不同位置,沙地土壤分形维数在沙堆顶部最大,分别为 1.72 , 1.68 和 1.66 ,并从沙堆顶部到坡脚呈现出减小的趋势;而盐碱地土壤分形维数表现为:沙堆顶部(1.69) $>$ 背风坡(1.66) $>$ 迎风坡(1.65)。

表3 不同生境白刺灌丛沙堆土壤粒度参数

Table 3 Soil particle size parameters of *Nitraria tangutorum* nebkhas in different habitats

参数	生境	土层深度/cm	迎风坡坡脚	迎风坡坡中	沙堆顶部	背风坡坡中	背风坡坡脚
平均粒径	沙地	0—5	2.08 ± 0.14^{Bb}	2.39 ± 0.04^{Aa}	2.35 ± 0.03^{Ca}	2.42 ± 0.05^{Aa}	2.37 ± 0^{Aa}
		5—10	2.06 ± 0^{Be}	2.28 ± 0.02^{Bd}	2.39 ± 0.03^{Aa}	2.32 ± 0^{Bc}	2.37 ± 0^{Ab}
		10—20	2.17 ± 0^{Ac}	2.05 ± 0.02^{Cd}	2.37 ± 0^{Ba}	2.29 ± 0.03^{Bb}	2.31 ± 0.02^{Bb}
	盐碱地	0—5	2.47 ± 0.02^{Cd}	3.01 ± 0.04^{Aa}	2.91 ± 0.07^{Ab}	2.69 ± 0.03^{Ac}	2.48 ± 0.03^{Cd}
		5—10	2.79 ± 0.13^{Bc}	3.01 ± 0.03^{Ab}	2.84 ± 0.02^{Bc}	2.23 ± 0.03^{Cd}	3.70 ± 0.06^{Ba}
		10—20	3.91 ± 0.07^{Aa}	2.97 ± 0.03^{Bb}	2.78 ± 0^{Cc}	2.46 ± 0.06^{Bd}	3.87 ± 0.23^{Aa}
标准偏差	沙地	0—5	-0.57 ± 0.02^{Bab}	-0.56 ± 0.02^{Aab}	-0.58 ± 0.03^{Bb}	-0.58 ± 0.03^{ABab}	-0.55 ± 0.01^{Aa}
		5—10	-0.55 ± 0.02^{Aa}	-0.56 ± 0.02^{Aa}	-0.55 ± 0^{Aa}	-0.59 ± 0^{Bb}	-0.55 ± 0^{Aa}
		10—20	-0.60 ± 0.01^{Cc}	-0.56 ± 0.02^{Aa}	-0.55 ± 0^{Aa}	-0.57 ± 0.02^{Aab}	-0.58 ± 0.02^{Bb}
	盐碱地	0—5	-0.62 ± 0.01^{Aa}	-1.13 ± 0.08^{Cc}	-1.02 ± 0.07^{Cb}	-0.97 ± 0.12^{Bb}	-0.66 ± 0.03^{Aa}
		5—10	-1.19 ± 0.10^{Bd}	-1.05 ± 0.06^{Bc}	-0.91 ± 0.06^{Bb}	-0.79 ± 0.11^{Aa}	-1.60 ± 0.07^{Bc}
		10—20	-1.85 ± 0.11^{Cc}	-0.90 ± 0.02^{Ab}	-0.77 ± 0.07^{Aa}	-0.98 ± 0.10^{Bb}	-1.95 ± 0.14^{Cc}
偏度值	沙地	0—5	-0.08 ± 0.08^{Ba}	-0.12 ± 0.07^{Ba}	-0.10 ± 0.06^{Ba}	-0.09 ± 0.07^{Ca}	-0.15 ± 0.01^{Ba}
		5—10	-0.15 ± 0^{Cc}	0.06 ± 0.03^{Aa}	-0.06 ± 0.12^{Ab}	0 ± 0^{Ba}	-0.15 ± 0^{Bc}
		10—20	-0.02 ± 0.02^{Ab}	-0.12 ± 0.07^{Bc}	-0.15 ± 0^{Cc}	0.04 ± 0.04^{Aa}	0.01 ± 0.04^{Aab}
	盐碱地	0—5	-0.07 ± 0.06^{Aa}	-0.41 ± 0.04^{Cc}	-0.36 ± 0.05^{Cbc}	-0.32 ± 0.08^{Bb}	-0.12 ± 0.05^{Aa}
		5—10	-0.44 ± 0.03^{Bd}	-0.37 ± 0.03^{Bc}	-0.31 ± 0.03^{Bb}	-0.24 ± 0.08^{Aa}	-0.44 ± 0.06^{Bd}
		10—20	-0.49 ± 0.06^{Bc}	-0.31 ± 0.04^{Ab}	-0.19 ± 0.05^{Aa}	-0.37 ± 0.06^{Bb}	-0.59 ± 0.07^{Cd}
峰态值	沙地	0—5	0.96 ± 0.06^{Aa}	0.98 ± 0^{Aa}	0.97 ± 0.07^{Aa}	1.01 ± 0.04^{Aa}	0.99 ± 0.03^{Aa}
		5—10	0.98 ± 0^{Aa}	0.98 ± 0^{Aa}	0.98 ± 0^{Aa}	0.98 ± 0^{Aa}	0.98 ± 0^{Aa}
		10—20	0.95 ± 0.06^{Aa}	0.97 ± 0.05^{Aa}	0.98 ± 0^{Aa}	0.98 ± 0^{Aa}	1.01 ± 0.06^{Aa}
	盐碱地	0—5	1.00 ± 0.08^{Bc}	2.23 ± 0.20^{Aa}	2.00 ± 0.24^{Aab}	1.85 ± 0.31^{Ab}	1.04 ± 0.11^{Ac}
		5—10	1.48 ± 0.12^{Abc}	1.95 ± 0.17^{Ba}	1.64 ± 0.16^{Bb}	1.35 ± 0.25^{Bc}	0.83 ± 0.02^{Bd}
		10—20	0.90 ± 0.03^{Cd}	1.60 ± 0.05^{Cb}	1.38 ± 0.14^{Cc}	1.77 ± 0.16^{Aa}	0.95 ± 0.13^{Ad}
分形维数	沙地	0—5	1.65 ± 0.05^{Ab}	1.72 ± 0.07^{Aa}	1.72 ± 0.05^{Aa}	1.70 ± 0.06^{Aab}	1.67 ± 0.11^{Aab}
		5—10	1.63 ± 0.07^{Aa}	1.65 ± 0.08^{Ba}	1.68 ± 0.07^{ABa}	1.63 ± 0.07^{ABa}	1.70 ± 0.05^{Aa}
		10—20	1.65 ± 0.07^{Aa}	1.63 ± 0.06^{Ba}	1.66 ± 0.06^{Ba}	1.62 ± 0.06^{Ba}	1.65 ± 0.06^{Aa}
	盐碱地	0—5	1.91 ± 0.06^{Bc}	2.16 ± 0.04^{Aa}	2.11 ± 0.03^{Aab}	2.06 ± 0.05^{Ab}	1.90 ± 0.05^{Cc}
		5—10	1.96 ± 0.08^{Bc}	2.14 ± 0.04^{Aa}	2.10 ± 0.03^{Aab}	1.86 ± 0.04^{Bd}	2.04 ± 0.07^{Bb}
		10—20	2.30 ± 0.06^{Aa}	2.03 ± 0.04^{Bb}	2.04 ± 0.04^{Bb}	1.86 ± 0.07^{Bc}	2.32 ± 0.06^{Aa}

2.3 白刺灌丛沙堆土壤粒配曲线

土壤颗粒频率分布曲线可表征土壤粒径分布情况。由图1可知,沙地土壤粒度在0—5 cm,5—10 cm,

10—20 cm土层内曲线均呈现单峰分布,波峰粒径位于 $2.01\sim2.32\phi$,峰值分布在 $10.17\%\sim10.81\%$ 。盐碱地土壤粒度曲线均呈现双峰分布,在波峰粒径位于

2.01~2.78 ϕ ,沙地土壤体积百分含量峰值整体高于盐碱地,而在波峰粒径位于4.95~5.25 ϕ ,盐碱地土壤体积百分含量高于沙地。根据土壤粒径累积频率曲线,可将土壤颗粒分为蠕移、跃移和悬移组分。在沙地不同位置不同深度土壤的粒度累积频率分布曲线斜率相近,而盐碱地随土层深度的增加,坡脚土壤悬移质含量出现明显增加趋势。沙地土壤的移动主要

以跃移为主,占土壤体积的97.42%~99.38%,盐碱地土壤的移动主要以跃移及悬移为主,含量分别为2.82%~37.82%,62.18%~97.07%。累积频率曲线的斜率反映不同组分的分选性,斜率越大,分选越好^[16]。由图1可知,白刺灌丛沙堆不同位置不同土层各组分的分选性均为:跃移>悬移>蠕移,沙地土壤分选性整体优于盐碱地。

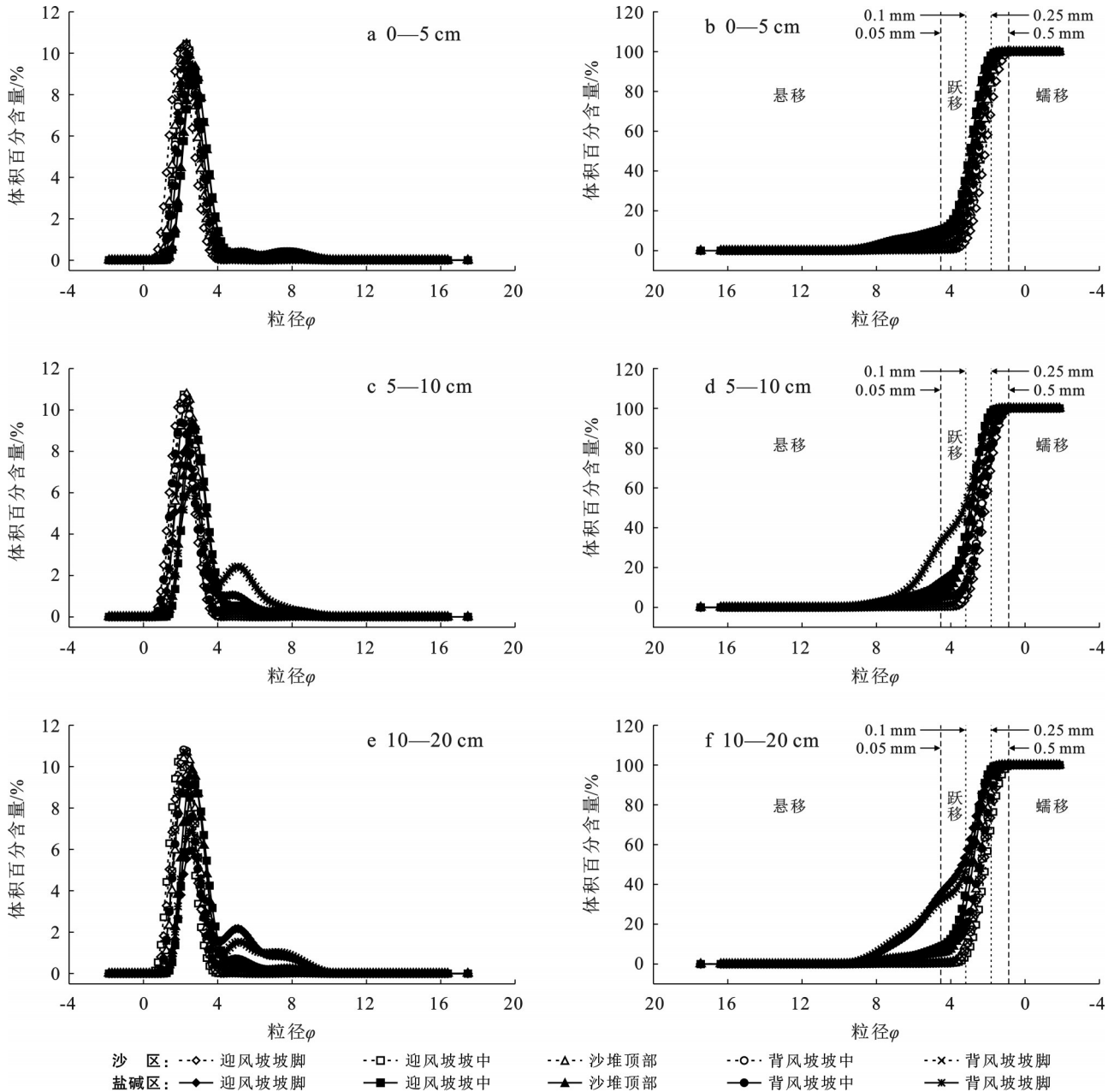


图1 不同生境白刺灌丛沙堆不同土层颗粒频率分布曲线

Fig.1 Particle frequency distribution curves for different soil layers of *Nitraria tangutorum nebkhas* in different habitats

2.4 白刺灌丛沙堆土壤养分特征

由表4可知,在两种生境下,白刺灌丛沙堆在同一位置,土壤养分在0—5 cm 土层养分含量最高,并且随着土层深度的增加而减小。沙地土壤 TN 表现为:沙堆顶部(3.16 g/kg)>背风坡坡脚(3.06 g/kg)

>背风坡坡中(2.52 g/kg)>迎风坡坡中(2.46 g/kg)>迎风坡坡脚(1.76 g/kg);盐碱地土壤 TN 含量在不同土层不同位置不具有显著性差异($p < 0.05$),含量大小表现为:背风坡坡脚(3.91 g/kg)>迎风坡坡中(3.86 g/kg)>迎风坡坡脚(3.78 g/kg)>沙堆顶部

(3.71 g/kg) > 背风坡坡中(3.39 g/kg)。沙地和盐碱地两种生境下土壤 TP 含量在沙堆顶部最高,分别为 0.15 和 0.23 g/kg,从沙堆顶部到(迎风坡、背风坡)坡脚 TP 含量逐渐减小,且背风坡坡脚 TP 含量高于迎风坡坡脚。对于白刺灌丛沙堆土壤 TK 含量,在沙地表现为:沙堆顶部(0.53 g/kg) > 迎风坡(0.43 g/kg) >

背风坡(0.42 g/kg);在盐碱地表现为:沙堆顶部(0.60 g/kg) > 迎风坡(0.56 g/kg) > 背风坡(0.54 g/kg)。两种生境下,盐碱地 pH 值显著高于沙地,且随着土层深度的增加呈现显著性增加($p < 0.05$)。整体上,白刺灌丛沙堆在盐碱地的 TN, TP, TK 含量及 pH 值均高于沙地。

表4 两种生境下白刺灌丛沙堆土壤养分特征

Table 4 Characteristics of soil nutrients in two habitats of *Nitraria tangutorum* nebkhas

养分指标	生境	土层深度/cm	迎风坡坡脚/(g·kg ⁻¹)	迎风坡坡中/(g·kg ⁻¹)	沙堆顶部/(g·kg ⁻¹)	背风坡坡中/(g·kg ⁻¹)	背风坡坡脚/(g·kg ⁻¹)
全氮	沙地	0—5	1.96±0.64 ^{Ab}	2.96±1.28 ^{Ab}	3.30±0.66 ^{Ab}	3.37±0.53 ^{Ab}	3.43±0.62 ^{Aa}
		5—10	1.84±0.80 ^{Aa}	2.82±0.61 ^{Ba}	3.07±0.91 ^{Aa}	2.21±0.81 ^{ABa}	3.31±0.53 ^{Aa}
		10—20	1.48±0.86 ^{Aa}	1.59±0.01 ^{Ca}	3.12±2.42 ^{Aa}	1.97±0.31 ^{Ba}	2.44±0.75 ^{Aa}
	盐碱地	0—5	3.54±0.52 ^{Aa}	4.04±0.27 ^{Aa}	3.83±0.58 ^{Aa}	3.35±0.29 ^{Aa}	3.38±0.39 ^{Aa}
		5—10	3.57±0.76 ^{Aa}	3.84±0.37 ^{Aa}	3.49±0.43 ^{Aa}	3.35±0.93 ^{Aa}	4.13±0.14 ^{Aa}
		10—20	4.24±0.29 ^{Aa}	3.72±0.81 ^{Aa}	3.81±0.75 ^{Aa}	3.47±0.69 ^{Aa}	4.21±0.72 ^{Aa}
全磷	沙地	0—5	0.12±0.02 ^{Ab}	0.17±0.02 ^{Aa}	0.18±0.01 ^{Aa}	0.17±0.02 ^{Ac}	0.22±0.01 ^{Aa}
		5—10	0.13±0.02 ^{Ac}	0.14±0.03 ^{ABb}	0.14±0.01 ^{Bb}	0.12±0.01 ^{Bc}	0.17±0.01 ^{Ba}
		10—20	0.12±0.01 ^{Ab}	0.12±0.02 ^{Bab}	0.13±0 ^{Ba}	0.10±0.01 ^{Cb}	0.11±0 ^{Cab}
	盐碱地	0—5	0.14±0.03 ^{Bc}	0.25±0.01 ^{Aa}	0.25±0.01 ^{Aa}	0.17±0.01 ^{Ab}	0.15±0.01 ^{Cc}
		5—10	0.15±0.01 ^{Bc}	0.23±0.01 ^{Ab}	0.23±0.02 ^{Ab}	0.13±0.01 ^{Bc}	0.25±0 ^{Aa}
		10—20	0.26±0.01 ^{Aa}	0.22±0.01 ^{Ab}	0.20±0.01 ^{Bc}	0.11±0.01 ^{Cd}	0.22±0.01 ^{Bb}
全钾	沙地	0—5	0.45±0.01 ^{Ab}	0.51±0.01 ^{Aa}	0.50±0.02 ^{Ba}	0.50±0.01 ^{Aa}	0.43±0 ^{Ac}
		5—10	0.39±0.01 ^{Bd}	0.43±0 ^{Bb}	0.61±0 ^{Aa}	0.42±0 ^{Bc}	0.40±0 ^{Bd}
		10—20	0.46±0.01 ^{Aa}	0.30±0 ^{Cd}	0.46±0.02 ^{Ca}	0.40±0.01 ^{Cb}	0.36±0 ^{Cc}
	盐碱地	0—5	0.64±0.05 ^{Aa}	0.65±0.01 ^{Aa}	0.64±0.01 ^{Aa}	0.54±0.01 ^{Bb}	0.44±0.01 ^{Cc}
		5—10	0.50±0.04 ^{Bb}	0.59±0 ^{Ba}	0.62±0.01 ^{Ba}	0.48±0.01 ^{Cb}	0.61±0 ^{Aa}
		10—20	0.47±0 ^{Bd}	0.51±0.01 ^{Cc}	0.54±0.01 ^{Cb}	0.58±0.01 ^{Aa}	0.57±0.01 ^{Ba}
pH值	沙地	0—5	8.42±0 ^{Ca}	7.76±0.01 ^{Ce}	8.31±0 ^{Cd}	8.40±0.01 ^{Cb}	8.33±0.02 ^{Ac}
		5—10	8.62±0.02 ^{Ba}	8.30±0.01 ^{Bd}	8.42±0.01 ^{Ac}	8.59±0.02 ^{Bb}	8.31±0.02 ^{Ad}
		10—20	8.71±0.01 ^{Ab}	8.58±0.01 ^{Ac}	8.34±0.02 ^{Bd}	8.76±0.01 ^{Aa}	8.31±0.01 ^{Ae}
	盐碱地	0—5	9.73±0.01 ^{Cb}	9.62±0 ^{Cc}	9.45±0.01 ^{Cd}	9.43±0.02 ^{Cd}	9.79±0.02 ^{Ca}
		5—10	10.09±0.01 ^{Bb}	9.93±0.01 ^{Bd}	9.80±0.02 ^{Be}	9.98±0.05 ^{Bc}	10.35±0.01 ^{Ba}
		10—20	10.26±0.02 ^{Abc}	10.24±0.01 ^{Ac}	10.14±0.01 ^{Ad}	10.27±0.01 ^{Ab}	10.5±0.01 ^{Aa}

2.5 白刺灌丛沙堆土壤粒径分布与土壤养分的相关系数和主成分分析

由表5可知,在沙地,白刺灌丛沙堆土壤分形维数与土壤细颗粒(0~100 μm)、TN及TP含量呈极显著正相关($p < 0.01$),与中砂和粗砂含量呈显著负相关($p < 0.05$);土壤黏粒含量与TP含量呈极显著正相关($p < 0.01$),与pH值呈显著负相关($p < 0.05$);土壤粉粒和极细砂含量与土壤TN,TP含量呈极显著正相关($p < 0.01$),与pH值呈显著负相关($p < 0.05$);土壤细砂、中砂及粗砂含量与TN含量呈极显著相关($p < 0.01$)。在盐碱地,白刺灌丛沙堆土壤分形维数

与黏粉粒、TN和TP含量呈极显著正相关($p < 0.01$),与中砂含量呈极显著负相关($p < 0.01$);土壤黏粒、粉粒含量与TP含量呈显著正相关($p < 0.05$);土壤极细砂含量与TP含量呈极显著正相关($p < 0.01$);土壤细砂含量与pH值呈极显著负相关($p < 0.01$);土壤中砂含量与TN,TP含量呈极显著负相关($p < 0.01$)。整体上,白刺灌丛沙堆在两种生境下,土壤养分与土壤细颗粒呈正相关($p < 0.05$),与土壤粗颗粒呈负相关($p < 0.05$)。整体上,白刺灌丛沙堆土壤颗粒与TN,TP具有显著相关性,而与TK,pH值相关性不高。

表 5 土壤粒径分布与土壤养分相关性

Table 5 Soil particle size distribution and correlation with soil nutrient

生境	指标	D	黏粒	粉粒	极细砂	细砂	中砂	粗砂
沙地	D	—	0.66**	0.95**	0.75**	0.56*	-0.64*	-0.52*
	全氮	0.78**	0.34	0.76**	0.88**	0.82**	-0.86**	-0.76**
	全磷	0.74**	0.66**	0.68**	0.65**	0.46	-0.53*	-0.43
	全钾	0.59*	0.34	0.51	0.61*	0.50	-0.54*	-0.44
	pH值	-0.75**	-0.64*	-0.62*	-0.57*	-0.46	0.51	0.41
盐碱地	D	—	0.94**	0.65**	0.56*	-0.35	-0.79**	-0.56*
	全氮	0.81**	0.73**	0.81**	0.44	-0.57*	-0.70**	-0.47
	全磷	0.83**	0.61*	0.56*	0.81**	-0.24	-0.90**	-0.57*
	全钾	0.19	0.07	-0.06	0.38	0.26	-0.38	-0.38
	pH值	0.17	0.24	0.64*	-0.19	-0.67**	-0.02	0.04

注:**表示 $p < 0.01$,相关性极显著,**表示 $p < 0.05$,相关性显著。D为分形维数。

主成分分析表明,在两种生境下,土壤各指标存在显著差异,而在同一生境下具有相似性。沙地和盐碱地白刺灌丛沙堆在第一主成分贡献率达56.7%,第二主成分贡献率为20.3%(图2),前两个主成分分析贡献率累计达77.0%,能够解释大多数信息。其中,粗砂、中砂和细砂与第一主成分呈负相关;而黏粒、粉粒和极细砂等7个指标与第一主成分呈正相关,且载荷值较大,表明这些指标有利于反映土壤分形维数的变化。而在第二主成分与粗砂、中砂、粉粒、黏粒和pH值呈现正相关性,载荷值较大的有细砂、粗砂和粉粒,说明这3个指标更有利于反映土壤分形维数的变化。

堆土壤的粒度组成和养分特征进行了分析。结果表明,不同生境下白刺灌丛沙堆土壤在粒度分布和养分含量上存在显著差异。通过对白刺灌丛沙堆土壤粒度分析,结果表明沙地土壤以中砂和细砂为主,黏粒和粉砂含量较少;而盐碱地土壤则更为细腻,土壤黏粉粒及极细砂比例相对较高。造成这一差异的主要原因与沙地和盐碱地的地貌特征和风化过程有关。一方面,相比盐碱地土壤而言,沙地土壤常年受到风蚀的影响,土壤颗粒较为粗大,通透性较高,但水分保持能力较差。另一方面,盐碱地土壤表层存在结皮现象^[17],且土壤中存在盐分的积累,使土壤结构更为致密,粒度更细。白刺灌丛在沙地中的分布主要受益于其耐旱性和对粗粒土壤的适应能力,而在盐碱地,白刺灌丛的存活则依赖于其耐盐能力及其根系对细粒土壤的渗透适应性^[18]。

沙地和盐碱地土壤平均粒径分别为196.74~253.24 μm 和105.08~228.80 μm ,表明盐碱地土壤平均粒度小于沙地,沙地土壤分选系数高于盐碱地,而峰态值小于盐碱地。通过土壤颗粒级配曲线能够反映出土壤颗粒的搬运和沉积状态^[13]。由图1可知,在长期风力作用下,白刺灌丛土壤颗粒主要以跃移、悬移为主,土壤颗粒的分选伴随着这一现象的发生,细小颗粒被吹向更远的地方,而相对较粗的土壤颗粒留了下来^[19]。分形维数能够揭示土壤颗粒分布的复杂性和自相似性^[20]。分形维数越高,表示土壤颗粒在不同尺度上分布的复杂性越大;相反,分形维数较低则表明土壤的多尺度特征较弱^[21]。在盐碱地(1.86~2.32)白刺灌丛分形维数显著高于沙地(1.62~1.72)。这一现象主要是由于沙地土壤较大的粒径不易被远距离搬运,从而形成了相对单一的颗粒分布,导致分形维数较低^[22]。土壤分形维数由小于0.5 mm的颗粒的体积含量所决定,其中0.1 mm可

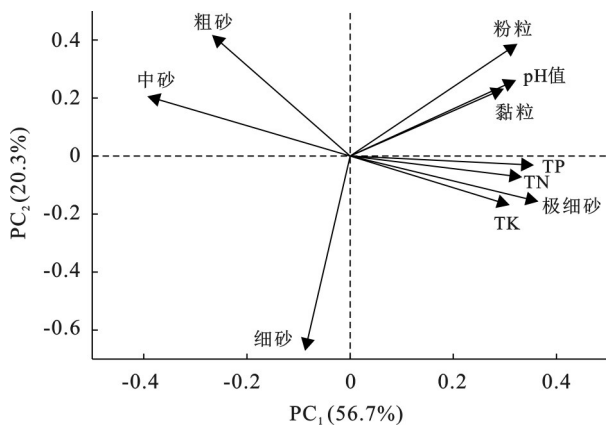


图 2 白刺灌丛土壤粒度组成、养分与分形维数的主成分分析

Fig. 2 Principal component analysis of soil particle size composition, nutrients and fractal dimension of *Nitraria tangutorum* nebkhas

3 讨论

3.1 白刺灌丛沙堆土壤粒度组成与土壤粒度参数特征

本研究对腾格里沙漠沙地与盐碱地白刺灌丛沙

作为临界粒径决定灌丛下土壤分形维数的大小^[23]。白刺灌丛沙堆在沙地土壤分形维数(1.62~1.72)与胡杨(1.93)、柽柳(1.98)等沙堆相比偏小的原因^[24],是由于白刺灌丛堆在沙地土壤粒径小于0.1 mm含量(1.72%~7.13%)较低所造成的。研究区土壤颗粒分形维数与黏粒和粉粒呈高度正相关,而与砂粒呈负相关,这一结果与其他学者^[25]的研究结果一致。表明土壤细颗粒越多,土壤颗粒分形维数越大,因此利用土壤颗粒分形维数评估土壤质地变化是可行的^[26]。

3.2 白刺灌丛沙堆土壤粒度组成及分形维数与土壤养分的关系

由表4可知,土壤养分含量随着土层深度的增加而减小。其中,沙地与盐碱地白刺灌丛沙堆土壤的养分含量具有显著性差异,具体表现为土壤TN, TP和TK含量在盐碱地整体高于沙地土壤含量。造成这一现象的原因,可能是由于盐碱地细颗粒土壤含量较高,细粒土壤具有较大的比表面积,对养分保留能力较强,使得养分在土壤中积累并滞留。而沙地土壤整体较粗,养分易流失,导致白刺灌丛沙堆土壤中养分含量偏低^[27]。此外,白刺灌丛通过根系和凋落物的分解作用,能够将养分返回土壤,从而逐渐提高土壤的肥力和养分含量^[28]。这种正向反馈机制在盐碱地表现更为显著,使得白刺灌丛在土壤养分积累和维持生态系统稳定方面发挥重要作用。由表5可知,土壤颗粒与TN, TP含量具有高度相关性,而与TK含量相关性不显著,这与TK以矿物形式(长石和云母)存在方式有关^[29],其分布较分散,且未必集中在细小颗粒中。TK的释放更多依赖矿物风化和溶解过程,而不只是颗粒结构^[30]。

土壤粒度与养分特征的差异对植被恢复具有深远影响。一方面,细粒度土壤在养分累积方面具有天然优势,而粗粒度土壤在这方面表现较为薄弱。表明在生态修复过程中,可以通过人工改良土壤粒度结构,如增加粉砂和黏粒比例,提升土壤的养分保持能力,从而促进植被恢复和稳定性。另一方面,白刺灌丛对土壤的肥力提升均具有积极作用,这种土壤改良功能也为其他植物种群的定居和扩散提供有利条件,有助于推进沙漠生态系统的恢复和稳定。此外,白刺灌丛对不同粒度和养分条件的适应性也证明其在干旱和盐碱环境中的生存能力,表明其在沙漠化治理中具有重要的应用前景。

4 结论

(1) 腾格里沙漠白刺灌丛沙堆在沙地、盐碱地两种生境下土壤粒度均以细砂为主,分别占总含量的

55.03%~74.21%, 44.71%~72.83%。其中,沙地土壤中砂、粗砂含量高于盐碱地,而极细砂、黏粉粒含量低于盐碱地。沙地(196.74~253.24 μm)土壤平均粒度大于盐碱地(105.08~228.80 μm),土壤分选性均极好。

(2) 白刺灌丛沙堆在盐碱地土壤分型维数显著高于沙地,分形维数分别处于1.86~2.32, 1.62~1.72。分形维数从白刺灌丛沙堆顶部到坡脚均呈减小趋势,而随着土层深度的增加同样呈减小趋势。

(3) 受土壤细颗粒的影响,盐碱地白刺灌丛沙堆土壤养分含量高于沙地。其中,土壤养分与细颗粒含量呈现正相关性,而与粗颗粒含量呈现负相关性。

参考文献(References)

- [1] Zhang Zhengcai, Dong Zhibao, Li Jiyan. Grain-size characteristics of dune networks in China's Tengger Desert [J]. *Geografiska Annaler (Series A: Physical Geography)*, 2015, 97(4): 681-693.
- [2] 柳丽云, 张德国, 杨小平, 等. 全新世以来腾格里沙漠风沙活动地质记录与模拟数据综合研究[J]. *第四纪研究*, 2024, 44(2): 394-415.
Liu Liyun, Zhang Deguo, Yang Xiaoping, et al. Evolution of aeolian activities in the Tengger Desert during the Holocene: Comprehensive research based on geological records and simulated data [J]. *Quaternary Sciences*, 2024, 44(2): 394-415.
- [3] 杨振奇, 秦富仓, 李龙, 等. 砒砂岩区不同侵蚀程度表土多重分形特征与持水特性关系[J]. *土壤*, 2021, 53(3): 620-627.
Yang Zhenqi, Qin Fucang, Li Long, et al. Relationship between soil particle multifractals and water holding capacity under different erosion degrees in feldspathic sandstone region [J]. *Soils*, 2021, 53(3): 620-627.
- [4] De Jonge L W, Moldrup P, Schjønning P. Soil infrastructure, interfaces & translocation processes in inner space ("soil-it-is"): Towards a road map for the constraints and crossroads of soil architecture and biophysical processes [J]. *Hydrology Earth System Sciences*, 2009, 13: 1485-1502.
- [5] Abell J T, Pullen A, Lebo Z J, et al. A wind-albedo-wind feedback driven by landscape evolution [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 96.
- [6] Yang Yingli, Yang Fan, Li Xiaoning, et al. Signal regulation of proline metabolism in callus of the halophyte *Nitraria tangutorum* Bobr. grown under salinity stress [J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 2013, 112(1): 33-42.
- [7] 王湘, 焦菊英, 曹雪, 等. 柴达木盆地尕斯库勒湖白刺灌丛沙堆剖面土壤养分的分布和富集特征[J]. *应用生态学*

- 报, 2022, 33(3):765-774.
- Wang Xiang, Jiao Juying, Cao Xue, et al. Distribution and enrichment characteristics of soil nutrients in the nebkhas profile of *Nitraria tangutorum* in Gahai Lake area, Qaidam Basin [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(3):765-774.
- [8] 周虹, 刘云祥. 高寒沙区土壤结皮对浅层土壤理化性质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(8):154-160.
- Zhou Hong, Liu Yunxiang. Effects of soil crusts on physicochemical properties of shallow soil in alpine sandy area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(8):154-160.
- [9] 贺俊. 毛乌素沙地樟子松人工林恢复过程中土壤粒径演变特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4):110-114, 129.
- He Jun. Characteristics of soil particle size evolution during restoration of *Pinus sylvestris* var. *Mongolica plantation* in Mu Us sandy land [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4):110-114, 129.
- [10] 孙忠超, 郭天斗, 于露, 等. 宁夏东部荒漠草原向灌丛地人为转变过程土壤粒径分形特征[J]. 草业学报, 2021, 30(4):34-45.
- Sun Zhongchao, Guo Tiandou, Yu Lu, et al. Changes in soil particle size distribution and fractal characteristics across an anthropogenic transition from desert steppe grassland to shrubland in eastern Ningxia [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(4):34-45.
- [11] 邓继峰, 万龙燕, 侯瑞萍, 等. 辽东山区5种林分土壤颗粒分形特征与土壤性质[J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(9):99-108.
- Deng Jifeng, Wan Longyan, Hou Ruiping, et al. Soil grain fractal characteristics and soil properties of five forest stand types in the Liaodong Mountains area [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(9):99-108.
- [12] 牧仁, 朱亮, 王丹阳, 等. 乌兰布和沙漠不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤养分和粒径的变化特征[J]. 草地学报, 2024, 32(3):818-826.
- Mu Ren, Zhu Liang, Wang Danyang, et al. Variation characteristics of soil nutrient and grain size in sand pile of *Nitraria tangutorum* shrub at different succession stages in Ulanbuhe Desert [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(3):818-826.
- [13] 马剑平, 王飞, 郭树江, 等. 民勤白刺灌丛沙堆演替过程中土壤粒径分形特征[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(5):46-52.
- Ma Jianping, Wang Fei, Guo Shujiang, et al. Fractal characteristics of soil particle size during *Nitraria tangutorum* shrub succession in Minqin [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(5):46-52.
- [14] 李晓佳, 姜洪涛, 周瑞平, 等. 腾格里沙漠东缘沙障布设方式对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5):50-58.
- Li Xiaojia, Jiang Hongtao, Zhou Ruiping, et al. Effect of layout way of sand barrier on sandy soil physicochemical properties [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5):50-58.
- [15] 丁国栋. 风沙物理学[M]. 2版. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- Ding Guodong. Aeolian physics [M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010.
- [16] Zhang Chunlai, Shen Yaping, Li Qing, et al. Sediment grain-size characteristics and relevant correlations to the aeolian environment in China's eastern desert region [J]. Science of The Total Environment, 2018, 627:586-599.
- [17] 胡鑫隆, 齐继, 于千钧, 等. 黄河三角洲不同长势怪柳对土壤水盐异质性的影响[J]. 土壤, 2022, 54(6):1291-1299.
- Hu Xinlong, Qi Ji, Yu Qianjun, et al. Effects of different *Tamarix chinensis* growth on variability of soil moisture and salinity in Yellow River delta [J]. Soils, 2022, 54(6):1291-1299.
- [18] 唐晓倩, 李金龙, 李焕勇, 等. NaCl处理对西伯利亚白刺幼苗生长及离子平衡的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(3):517-524.
- Tang Xiaolian, Li Jinlong, Li Huanyong, et al. Effect of NaCl treatment on growth and ion homeostasis of *Nitraria sibirica* seedlings [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2018, 38(3):517-524.
- [19] 陈新闯, 郭建英, 董智, 等. 乌兰布和沙漠流动沙丘下风向降尘粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(2):295-301.
- Chen Xinchuang, Guo Jianying, Dong Zhi, et al. Grain size characteristics of dustfall in the Ulan Buh Desert [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(2):295-301.
- [20] 张宇, 徐宗恒, 查玲珑, 等. 云南永胜古滑坡堰塞湖沉积物粒度多重分形特征及其指标适用研究[J]. 地理科学, 2024, 44(9):1666-1675.
- Zhang Yu, Xu Zongheng, Zha Linglong, et al. Multi-dimensional fractal characteristics of ancient landslide-dammed lake sediments at Yongsheng County of Yunnan Province and its indicators applicable to research [J]. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(9):1666-1675.
- [21] 刘红梅, 吕世杰, 任倩楠, 等. 巴丹吉林沙漠梭梭林下沙质土壤的粒径变化和空间分布特征研究[J]. 草地学报, 2021, 29(6):1249-1256.
- Liu Hongmei, Lyu Shijie, Ren Qiannan, et al. The study on particles sizes and spatial distribution of sandy soil under *Haloxylon ammodendron* forest in Badain Jaran Desert [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(6):

- 1249-1256.
- [22] 张亚静,张春来,魏国茹,等.藏北青南高原地表风蚀粗化特征[J].地理研究,2022,41(10):2793-2807.
Zhang Yajing, Zhang Chunlai, Wei Guoru, et al. Characteristics of land surface coarsening by wind erosion on the Northern Tibet and Southern Qinghai Plateau [J]. Geographical Research, 2022,41(10):2793-2807.
- [23] 董雪,迟悦春,许德浩,等.西鄂尔多斯荒漠灌丛土壤粒径分形特征与养分的耦合关系[J].草业科学,2020,37(12):2403-2413.
Dong Xue, Chi Yuechun, Xu Dehao, et al. Fractal features of soil and their relationship with soil nutrients under desert shrubs in the West Ordos region [J]. Prata-cultural Science, 2020,37(12):2403-2413.
- [24] 肖佳奇,武胜利,陈鹏鹏.和田河下游灌丛沙堆表层沉积物粒度和分形特征[J].中国沙漠,2024,44(4):24-36.
Xiao Jiaqi, Wu Shengli, Chen Pengpeng. Grain size and fractal characteristics of surface sediments of nebkhas in the lower reaches of Hetian River, Xinjiang, China [J]. Journal of Desert Research, 2024,44(4):24-36.
- [25] 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 Dandan, Gao Ruizhong, Jia Debin. 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.
- [26] 刘一迪,姬王佳,李志.陕北黄土区不同植被下深剖面土壤的分形特征[J].水土保持研究,2024,31(5):250-256,264.
Liu Yidi, Ji Wangjia, Li Zhi. Soil fractal characteristics of deep profiles under different vegetation in loess areas of Northern Shaanxi, China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(5):250-256,264.
- [27] 黄昌勇,徐建明.土壤学[M].3版.北京:中国农业出版社,2010.
Huang Changyong, Xu Jianming. Pedology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010.
- [28] 田思惠,柳鑫,金宝成,等.三工河流域琵琶柴群落凋落物对土壤有机碳固定的影响[J].生态学报,2019,39(14):5339-5347.
Tian Sihui, Liu Xin, Jin Baocheng, et al. Effects of litter on soil organic carbon fixation in *Reaumuria soongorica* communities in the Sangong River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(14):5339-5347.
- [29] 赵义涛,姜佰文,梁运江.土壤肥科学[M].北京:化学工业出版社,2009.
Zhao Yitao, Jiang Baiwen, Liang Yunjiang. Soil and Fertilizer Science [M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [30] 周健民,沈仁芳.土壤学大辞典[M].北京:科学出版社,2013.
Zhou Jianmin, Shen Renfang. Dictionary of soil science [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- ~~~~~
- (上接第186页)
- [20] 余科.农作物产量概率密度函数以及农业保险费率的非参数核估计[D].湖北武汉:华中科技大学,2022.
Yu Ke. Nonparametric kernel estimation of crop yield density and insurance rate [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [21] Huang Mengtian, Piao Shilong, Janssens I A, et al. Velocity of change in vegetation productivity over northern high latitudes [J]. Nature Ecology & Evolution, 2017,1(11):1649-1654.
- [22] Wu Donghai, Zhao Xiang, Liang Shunlin, et al. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change [J]. Global Change Biology, 2015,21(9):3520-3531.
- [23] 吴彤.论复杂性与随机性的关系[J].自然辩证法通讯,2002,24(2):18-23.
Wu Tong. On relationships between complexity and randomness [J]. Journal of Dialectics of Nature, 2002,24(2):18-23.
- [24] Seddon N, Smith A, Smith P, et al. Getting the message right on nature-based solutions to climate change [J]. Global Change Biology, 2021,27(8):1518-1546.
- [25] Han Zhiming, Huang Shengzhi, Huang Qiang, et al. GRACE-based high-resolution propagation threshold from meteorological to groundwater drought [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021,307:108476.
- [26] Han Zhiming, Huang Shengzhi, Peng Jian, et al. GRACE-based dynamic assessment of hydrological drought trigger thresholds induced by meteorological drought and possible driving mechanisms [J]. Remote Sensing of Environment, 2023,298:113831.
- [27] Leng Guoyong, Hall J. Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to droughts and the projected changes in the future [J]. Science of The Total Environment, 2019,654:811-821.