

# 古尔班通古特沙漠西南缘柽柳沙包土壤粒度分布特征

董正武<sup>1,2</sup>, 李生字<sup>2</sup>, 毛东雷<sup>3</sup>, 雷加强<sup>2</sup>

(1.新疆师范大学生命科学学院, 乌鲁木齐 830054; 2.中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 3.新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

**摘要:** 柽柳(*Tamarix chinensis*)沙包是古尔班通古特沙漠地区特殊的生物地貌景观,对维持区域生态环境稳定具有重要作用。采用野外调查与室内分析相结合的方法,对古尔班通古特沙漠西南缘柽柳沙包 0—500 cm 层土壤粒度特征进行分析。结果表明:(1)该地区柽柳沙包土壤粒度组成以细粒物质为主,其中粉粒含量最高,其次为极细沙粒,两者含量达到 80%以上,且 50  $\mu\text{m}$  以下土壤粒度含量在 57%以上。(2)随着土层深度的增加,黏粒、粉粒、平均粒径及分形维数总体呈先升高后降低再升高的变化趋势,极细沙粒、细沙粒及分选系数总体呈先降低后升高再降低的变化,土壤总体分选性较差,偏度呈正偏态,峰态呈中等峰态。分形维数、平均粒径与黏粒、粉粒呈显著正相关,与极细沙粒、细沙粒呈显著负相关,表明分形维数和平均粒径能够较好地反映柽柳沙包土壤粒度组成特征。(3)柽柳沙包土壤粒度的形成受土壤含水量、pH、全磷、有机质及电导率等土壤特性的影响。研究结果表明,平均粒径和分形维数能够较好地反映柽柳沙包土壤粒度分布特征,柽柳沙包土壤粒度组成是荒漠—绿洲过渡带土壤形成中不可忽视的潜在物质基础。

**关键词:** 柽柳沙包; 土壤粒度; 分形维数; 古尔班通古特沙漠

中图分类号: S152.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)04-0064-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.04.010

## Distribution Pattern of Soil Grain Size in *Tamarix* Sand Dune in the Southwest of Gurbantunggut Desert

DONG Zhengwu<sup>1,2</sup>, LI Shengyu<sup>2</sup>, MAO Donglei<sup>3</sup>, LEI Jiaqiang<sup>2</sup>

(1.College of Life Sciences, Xinjiang Normal University, Ürümqi 830054;

2.Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Ürümqi 830011;

3.College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Ürümqi 830054)

**Abstract:** *Tamarix chinensis* sand dunes are specific bio-geographical landscape in Gurbantunggut Desert, which play an important role in maintaining the stability of regional ecological environment. Based on field investigation and indoor analysis, the soil grain size characteristics of 0—500 cm soil layer in *T. chinensis* sand dunes in the southwest of Gurbantunggut Desert were analyzed. The results showed that: (1) Soil grain size composition of *T. chinensis* sand dunes was dominated by silt and very fine sand, and the content was more than 80%, furthermore, the content of soil particle below 50  $\mu\text{m}$  accounted for more than 57%. (2) With the increasing soil depth, the content of clay and silt, average particle size and sorting coefficient showed the trend of increase-decrease-increase. In general, the content of very fine sand and fine sand, skewness and kurtosis showed the trend of decrease-increase-decrease. The overall sorting ability of soil was poor. Kurtosis was generally mesokurtic peak, and the grain size distribution was positive skewness. The fractal dimension and average particle size were significantly positively correlated with clay and silt, and negatively correlated with very fine sand and fine sand, indicating that fractal dimension and average particle size could better reflect the characteristics of soil particle size composition of *T. chinensis* sand dunes. (3) Soil particle size of *T. chinensis* sand dunes was affected by soil water content, pH, total phosphorus, organic matter and electrical conductivity. The average particle size and fractal dimension could well reflect the characteristics of soil particle distribution in the profile of *T. chinensis* sand dunes, and soil grain size composition of *T. chinensis* sand

收稿日期: 2021-03-10

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(41571011); 新疆师范大学优秀青年教师科研启动基金项目(XJNU202011)

第一作者: 董正武(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事荒漠植物与土壤耦合关系研究。E-mail: dongzw2018@sina.com

通信作者: 李生字(1975—), 男, 博士, 研究员, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: lishy\_hb@163.com

dunes was a potential material basis for soil formation in the desert-oasis transition zone.

**Keywords:** *Tamarix* sand dune; soil particle size; fractal dimension; Gurbantunggut Desert

土壤是由不同形态大小的固相颗粒及孔隙以一定形式组成的分散多孔介质,是生物与环境相互作用的重要媒介<sup>[1]</sup>。土壤粒度作为土壤结构的基本单元,与土壤理化性质及成土过程等密切相关,其分布特征不仅反映土壤颗粒的组成与大小,而且对土壤的水力、肥力状况及土壤侵蚀等具有重要的影响<sup>[2]</sup>。因此,定量研究和描述土壤粒度分布特征是土壤物理学研究的重点。平均粒径、分选系数、峰态、偏态及分形维数作为反映土壤粒度分布的有效指标,广泛应用于土壤粒度分布特性及相关的研究中<sup>[3-4]</sup>。已有研究<sup>[5-6]</sup>表明,平均粒径及偏度变化主要反映土壤粗细颗粒集中变化的过程,而分选系数与峰态可表征土壤颗粒的分散变化程度。分形维数作为反映土壤结构几何形状的参数,不仅可表征土壤颗粒的大小、质地的均匀程度,而且也可反映土壤水分及养分等理化性质对环境因子(植被、土地利用等)的影响<sup>[7-9]</sup>。已有研究<sup>[10-11]</sup>认为,土壤细粒物质含量与分形维数间存在显著的正相关。因此,运用以上参数进行土壤粒度分析是研究土壤物理特性的基础。

怪柳沙包作为高大的灌丛沙丘,主要是由风沙和枯枝落叶长期交互堆积而成,在保障绿洲生态安全及遏制沙漠蔓延等方面发挥着重要作用<sup>[12]</sup>。然而,由于长期的风沙侵蚀及人类对土地资源的开发利用,古尔班通古特沙漠地区怪柳沙包呈衰败、退化趋势;尤其在古尔班通古特沙漠西南缘地区,由于土地的开垦及地下水位的下降,怪柳沙包的退化更加明显,导致该地区环境具有向荒漠化或沙丘演化的趋势,进而带来严重的生态环境问题<sup>[12-13]</sup>。因此,亟需对该地区怪柳沙包开展系统且深入的研究。目前,关于怪柳沙包的研究主要集中在其形成机理、形态结构、环境指示意义、土壤盐分分布以及怪柳灌丛沙堆表层土壤粒度分布等方面<sup>[12,14-16]</sup>。刘进辉等<sup>[15]</sup>研究认为,随着植被盖度的降低,怪柳灌丛沙堆表层土壤平均粒径升高,且土壤颗粒由黏粒逐渐转变为粗沙粒;从灌丛下到灌丛边缘及丘间地,平均粒径依次增大。土壤颗粒组成是怪柳沙包土壤形成的物质基础,因此,对怪柳沙包土壤粒度组成的研究极其必要。由于受长期气候变化、生物作用及地下水变化等多种因素的影响,从较小怪柳沙堆发育成高大怪柳沙包过程中,土壤粒度组成如何变化,怪柳沙包剖面土壤粒度分布及分形特征是否也受土壤本身性质的影响目前尚不清楚。基于此,本研究以古尔班通古特沙漠西南缘地区荒漠—绿洲过渡带的怪柳沙包为研究对象,通过对怪柳

沙包土壤粒度组成及其相关参数的分析,揭示怪柳沙包的土壤粒度分布特征,探讨怪柳沙包形成对区域生态环境的影响。研究结果有助于阐明怪柳沙包的土壤形成过程,并对理解干旱沙漠地区怪柳灌丛在风沙环境中的作用,以及环境变化对怪柳沙包成土过程的影响提供理论基础,也为怪柳沙包的保护及其利用提供理论依据。

## 1 研究区概况

古尔班通古特沙漠(84.52°—90.00°E, 44.18°—46.33°N)地处准噶尔盆地中心,面积约为 $5.11 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是我国最大的固定和半固定沙漠。地貌类型主要为各种类型的沙垄、沙丘链及蜂窝状沙丘。该地区年平均温度约 $5 \sim 8 \text{ }^\circ\text{C}$ , $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 的年积温约 $3\ 000 \sim 3\ 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年平均降水量约 $70 \sim 120 \text{ mm}$ ,主要发生于冬季(降雪)和春季(降雨),冬季积雪厚度约为 $13 \text{ cm}$ ,最厚可达 $27 \text{ cm}$ 。春夏季为风季,控制本区域的风系主要是西风气流和蒙古高压形成的西北和东北风系,起沙风速 $\geq 6 \text{ m/s}$ ,以4—6月最强盛,最大风速达 $20 \text{ m/s}$ ;年平均潜在蒸发量超过 $2\ 000 \text{ mm}$ ,为典型的温带干旱荒漠气候<sup>[17]</sup>。地下水埋深约为 $30 \text{ m}$ ,植物生长很难利用到地下水,主要依靠降水。植被以短命、类短命植物及早生草灌木为主,植物种类丰富、生活型多样,植被类型主要为梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白梭梭(*Haloxylon persicum*)、多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)、麻黄(*Ephedra sinica*)、绢蒿(*Seriphidium*)等,部分可形成大小不等的植丛沙堆。

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计

根据怪柳沙包形成过程中的气候、水文及植被分布等特征,本研究以古尔班通古特沙漠西南缘的怪柳沙包为研究对象,选择荒漠—绿洲过渡带的典型怪柳沙包分布区为研究区(图1),沙包上的怪柳盖度为50%左右,怪柳沙包周围伴生有梭梭、白梭梭及早春短命植物等<sup>[17]</sup>。由于人类活动对水资源的利用,地下水埋深在 $30 \text{ m}$ 以下,土壤主要为风沙土。本研究通过大面积的野外调查,选择典型怪柳沙包分布区作为样区,在样区随机选择6个长势较为一致、大小相近、处于稳定阶段、发育成熟的怪柳沙包(高度为 $2.5 \pm 0.3 \text{ m}$ ,直径约为 $10 \text{ m}$ )。

### 2.2 土壤样品采集

为避免降水对土样采集造成影响,选择基本没有降水发生的夏季进行采样。于2018年7月进行样品

采集。在每个怪柳沙包顶部的中心位置(灌丛下),用土钻以 20 cm 为 1 层分层进行采样;根据怪柳沙包的高度,取样深度设定为 0—500 cm,即每个沙包采集土样 25 个,6 个怪柳沙包共采集土样 150 个,装入自封袋,带回实验室进行测试和分析。

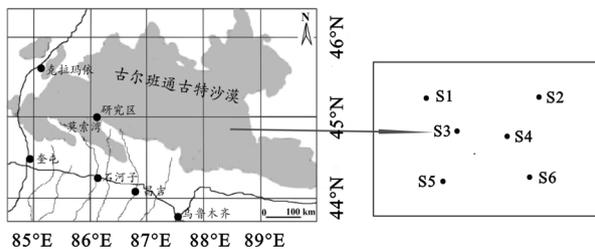


图 1 古尔班通古特沙漠怪柳沙包采样

## 2.3 指标测定

土样在室内经自然风干后分成 2 部分:一部分过 2 mm 的筛,用于土壤粒度分析;一部分过 0.5 mm 的筛,用于土壤理化性质分析。按照试验规范对土样进行预处理,土壤粒度采用 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度仪(粒径 0.02~2 000  $\mu\text{m}$ )进行测定,测得各粒径含量以体积百分含量表示,并通过 Folk-Ward 公式计算平均粒径( $M_G$ )、分选系数( $\sigma_G$ )、偏度( $SK_G$ )和峰态( $K_G$ )<sup>[18-19]</sup>。

采用美国制土壤颗粒大小的分级标准:沙粒(2.0~0.05 mm,其中 2.0~1.0 mm 为极粗沙粒,1.0~0.5 mm 为粗沙粒,0.5~0.25 mm 为中沙粒,0.25~0.1 mm 为细沙粒,0.1~0.05 mm 为极细沙粒)、粉粒(0.05~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)。土壤粒度分形维数采用 Tyler 等<sup>[20]</sup>的方法计算:

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

式中: $D$  为土壤分形维数; $r$  为土壤粒度(mm); $R_i$  为粒度等级  $i$  的土壤粒度(mm); $R_{\max}$  为土壤粒度的极大值(mm); $V_{(r < R_i)}$  为土壤粒径 <  $R_i$  的土壤体积分数(%); $V_T$  为各粒度等级体积分数之和(%)。

土壤 pH 采用 pH 计(pHS-2C)测定;土壤水分含量(SWC)采用烘干称重法测定;土壤电导率(EC)采用电导率仪(DDS-307)测定;土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定;土壤全氮(TN)采用凯氏定氮法测定;土壤全磷(TP)采用钼锑抗比色法测定。具体分析参见《土壤农化学分析》<sup>[21]</sup>。

## 2.4 取样土层确定

基于怪柳沙包土壤剖面相邻土层间粒度组成的差异显著性分析,将土层共划分为 7 个层次:0—80, 80—160, 160—240, 240—300, 300—420, 420—440, 440—500 cm。

## 2.5 数据分析

利用 R3.5.2 软件进行描述性统计分析、单因素

方差分析(One-way ANOVA)、多重比较(LSD)、Pearson 相关性分析(Hmisc 程序包)、回归分析及 db-RDA 分析(ggvegan 程序包),并运用 Origin 2017 软件绘图。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤粒度组成与参数变化

怪柳沙包土壤粉粒含量最高,约为 51.6%~94.1%;其次为极细沙粒,含量为 0~31.9%;细沙粒和黏粒含量相对较少,分别为 0~18.8%和 0.5%~17.5%;中沙粒含量仅为 0~1.0%。怪柳沙包剖面土壤粒度组成以粉粒和极细沙粒为主,两者含量达到 80%以上。在 80—300 cm 及 440—500 cm 层粉粒含量达到 85%以上,而在 0—80 cm 及 300—420 cm 层,沙粒含量约在 30%以上,440—500 cm 层黏粒含量约为 10%(表 1)。

随着土层深度的增加,黏粒和粉粒含量总体呈先升高后降低再升高的变化。黏粒含量在 440—500 cm 和 240—300 cm 层明显高于其他各层,且含量在 300—420 cm 层最低( $p < 0.05$ );粉粒含量在 160—300 cm 层明显高于其他各层,且含量在 300—420 cm 层最低( $p < 0.05$ )。随着土层深度的增加,极细沙粒和细沙粒含量总体呈先降低后升高再降低的变化;极细沙粒和细沙粒含量在 300—420 cm 层明显高于其他各层,在 440—500 cm 层含量最低( $p < 0.05$ );中沙粒仅在 300—420 cm 层有分布,且含量极低(表 1)。

表 1 怪柳沙包的土壤粒度分布特征

土层深度/cm	黏粒/%	粉粒/%	极细沙粒/%	细沙粒/%	中沙粒/%
0—80	1.4±0.2a	67.5±1.7a	25.6±1.2a	5.6±0.7a	0±0a
80—160	1.4±0.5a	89.7±1.7b	7.5±1.4b	0.1±0b	0±0a
160—240	2.9±0.5b	94.1±0.8c	2.7±1.0c	0.3±0c	0±0a
240—300	7.7±1.6c	92.2±1.5c	0.1±0d	0±0b	0±0a
300—420	0.7±0.1d	51.6±1.5d	31.9±0.6e	15.3±1.2d	0.4±0.2b
420—440	2.8±0.4b	78.4±1.3e	17.2±1.3f	1.5±0.5e	0±0a
440—500	13.3±2.5e	86.7±2.5b	0±0d	0±0b	0±0a

注:表中数据为平均值±标准误;同列不同字母表示不同土层深度间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

土壤粒度频率分布的宽窄和波峰在不同土层呈现一定的差异(图 2)。随着土层深度的增加,粒度频率分布曲线的波峰呈先升高后降低再升高的变化。在 0—80, 80—160, 160—240, 240—300 cm 层,粒度频率分布曲线波峰分别出现在 42.42, 22.32, 20.05, 9.48  $\mu\text{m}$  附近,且曲线分布呈变窄的趋势,50  $\mu\text{m}$  以下粒度含量分别为 73.61%, 94.82%, 95.09% 和 100.00%。在 300—420, 420—440, 440—500 cm 层,粒度频率分布曲线波峰分别出现在 58.49, 30.78, 5.55  $\mu\text{m}$  附近;300—420 cm 层波峰出现的最晚,且曲线分布最宽;440—500 cm 层波峰明显高于其他各

层, 曲线分布最窄; 50  $\mu\text{m}$  以下粒度含量分别为

57.12%, 85.03% 和 100.00%。

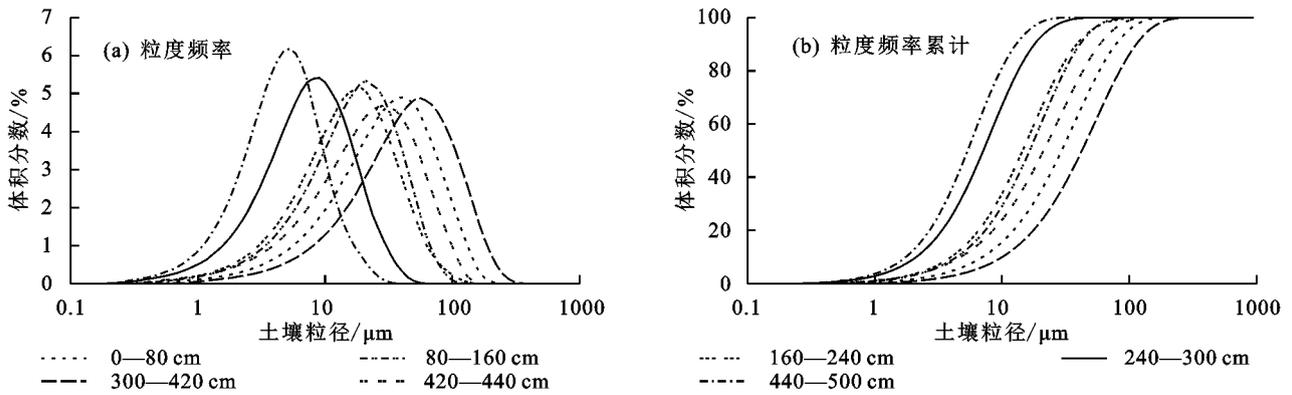


图 2 怪柳沙包土壤剖面粒度频率分布曲线

随着土层深度的增加, 平均粒径与分形维数均呈先升高后降低再升高的变化, 分选系数呈先降低后升高再降低的变化(表 2)。

平均粒径为 4.535~7.721, 在 300—420 cm 层最低, 在 440—500 cm 层最高, 与其他各层存在明显差异 ( $p < 0.05$ )。土壤剖面总体分选性较差, 偏度呈正偏态, 峰态呈中等峰态。偏度和峰态在各层间没有明显差异 ( $p > 0.05$ )。

分形维数在 300—420 cm 层最低, 在 440—500 cm 层最高, 且与其他各层存在明显差异 ( $p < 0.05$ )。

表 2 怪柳沙包土壤粒度参数特征

土层深度/cm	平均粒径 ( $M_G$ )	分选系数 ( $\sigma_G$ )	偏度 ( $SK_G$ )	峰态 ( $K_G$ )	分形维数
0—80	5.062±0.137a	1.350±0.025a	0.193±0.002a	1.040±0.001a	2.491±0.018a
80—160	5.885±0.063b	1.254±0.116ab	0.189±0.003a	1.038±0a	2.530±0.018b
160—240	6.028±0.267b	1.214±0.050b	0.189±0.005a	1.038±0.001a	2.531±0.022b
240—300	6.789±0.631b	1.166±0.091c	0.189±0.002a	1.038±0.002a	2.589±0.027c
300—420	4.535±0.127c	1.359±0.073c	0.194±0.004a	1.038±0.001a	2.438±0.019d
420—440	5.543±0.235b	1.417±0.039a	0.198±0.005a	1.038±0.001a	2.526±0.037b
440—500	7.721±0.434e	1.008±0.113e	0.185±0.003a	1.039±0a	2.595±0c

### 3.2 土壤粒度分形维数与各参数间的线性拟合关系

土壤分形维数与大多数粒度组成及参数间呈一定的线性关系(图 3)。分形维数与黏粒、粉粒及沙粒的拟合程度均较好, 决定系数介于 0.639~0.867, 且分形维数与黏粒、粉粒呈显著正相关, 与沙粒呈显著负相关 ( $p < 0.05$ )。此外, 分形维数与平均粒径的线性拟合程度最好, 且呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 决定系数为 0.899; 与分选系数和偏度之间的拟合程度一般, 且呈显著负相关 ( $p < 0.05$ ), 决定系数分别为 0.450 和 0.241; 而与峰态之间没有明显相关性。

粒径和分形维数能够较好地反映怪柳沙包的土壤粒度分布特征。

### 3.3 土壤粒度组成与各参数间的相关关系

就不同深度而言, 在 0—80, 160—240 cm 层, 平均粒径和分形维数与黏粒及粉粒呈极显著正相关, 与极细沙粒、细沙粒呈显著负相关; 240—300 cm 层平均粒径和分形维数与黏粒呈极显著正相关, 与粉粒、极细沙粒呈显著负相关(表 3), 表明在 0—80, 160—300 cm 层平均粒径和分形维数能够较好地反映土壤粒度特征。80—160 cm 层分选系数与粉粒呈极显著负相关, 与黏粒、极细沙粒呈显著正相关, 分形维数与黏粒呈显著正相关; 300—420 cm 层分选系数和分形维数与黏粒呈显著正相关, 与极细沙粒呈显著负相关; 平均粒径与粉粒呈极显著正相关, 与细沙粒呈显著负相关, 表明在 0—80, 300—420 cm 层分选系数、分形维数及平均粒径均能够反映土壤粒度分布特征; 420—440 cm 层平均粒径与黏粒呈极显著正相关, 与粉粒呈极显著负相关; 440—500 cm 层黏粒与平均粒径、偏度呈显著正相关, 分选系数、偏度及峰态与粉粒和极细沙粒呈显著负相关, 与细沙粒呈显著正相关。

根据 Pearson 相关性分析, 黏粒、粉粒与平均粒径及分形维数呈极显著正相关, 而与分选系数、偏态呈极显著负相关; 极细沙粒、细沙粒与平均粒径及分形维数呈极显著负相关, 而与分选系数、偏度呈正相关; 中沙粒仅与平均粒径和分形维数呈显著正相关; 而峰态与各粒度参数间没有明显相关性。此外, 平均粒径与分选系数、偏度之间呈极显著负相关, 分选系数与偏度之间呈极显著正相关(图 4)。这说明平均

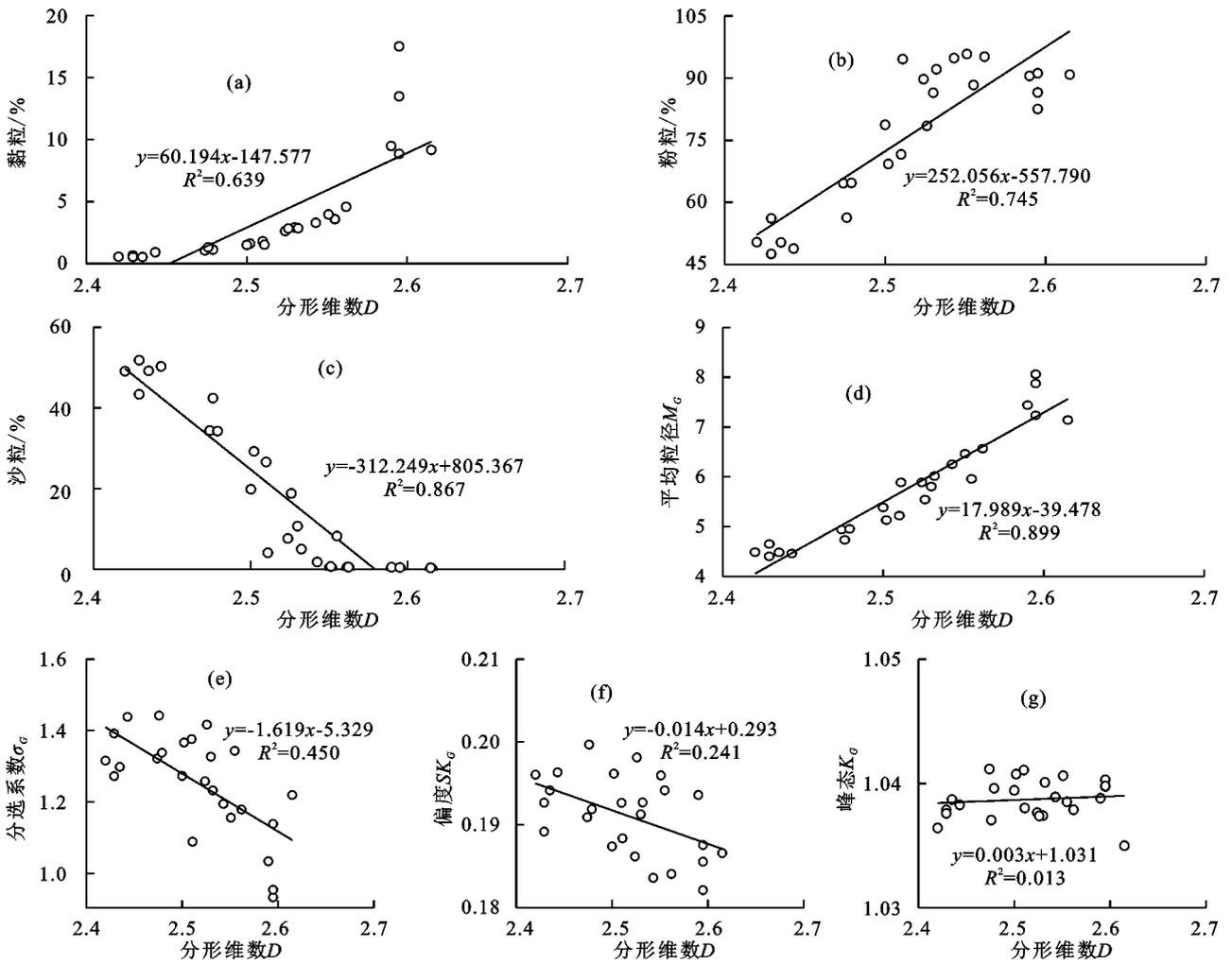
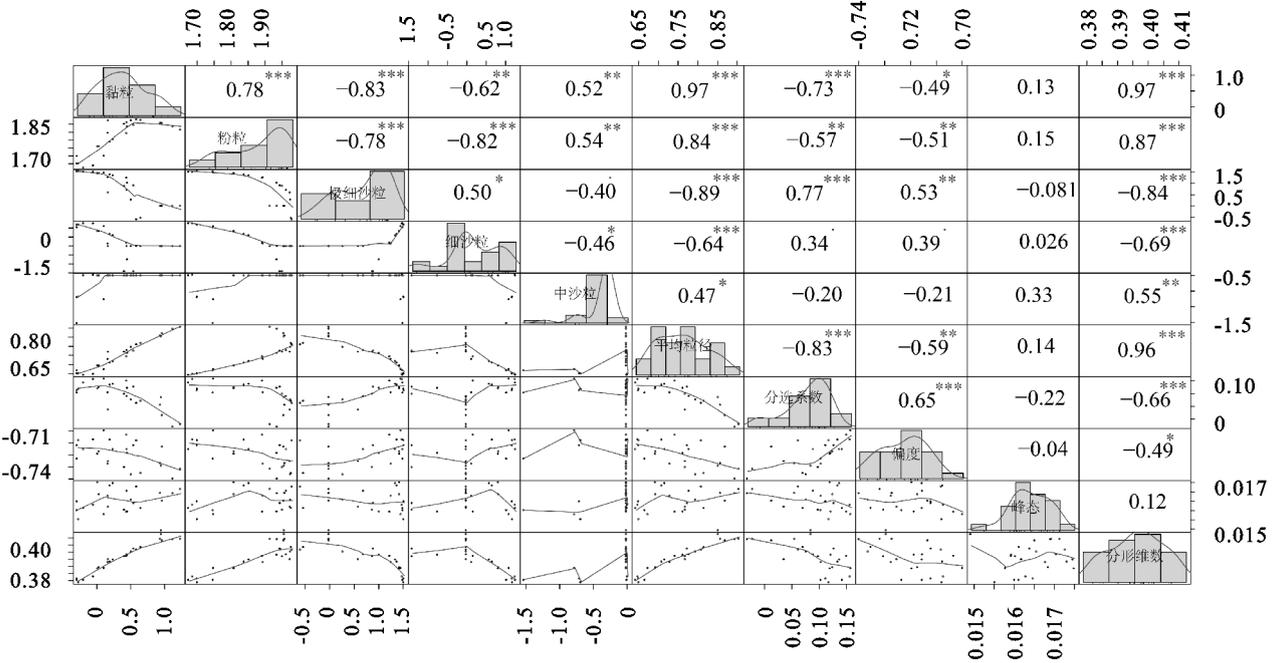


图 3 柘柳沙包土壤分形维数与粒度组成间的线性关系



注: \* 表示  $p < 0.05$ ; \*\* 表示  $p < 0.01$ ; \*\*\* 表示  $p < 0.001$ 。

图 4 柘柳沙包土壤粒度分布及参数间的 Pearson 相关关系

### 3.4 土壤粒度组成与各因子间的相关性分析

根据 Pearson 相关性分析,在 0—80 cm 层,除 TP 和 TK 外,其他各因子与土壤粒度组成间没有明

显的相关性;TP 与黏粒、粉粒及分形维数呈显著正相关,与极细沙粒、细沙粒呈显著负相关(表 4)。在 80—160 cm 层,黏粒、分形维数与 pH 呈显著负相关,与

电导率呈显著正相关;SWC与分形维数呈显著负相关。在160—240 cm层,pH与黏粒、粉粒、分形维数呈极显著正相关,与极细沙粒及细沙粒呈极显著负相关;SOC、TN、TP与粉粒呈显著正相关,与极细沙粒及细沙粒呈显著负相关。而在240—300 cm层,SWC、pH与黏粒、分形维数呈显著正相关,与粉粒呈显著负相关;黏粒与EC、TK呈显著正相关,分形维数与TP呈显著负相关。在300—420 cm层,TP与黏粒、分形维数呈极显著正

相关,与极细沙粒呈显著负相关;TK与粉粒呈显著正相关,与细沙粒呈极显著负相关;EC与平均粒径呈显著正相关。在420—440 cm层,各因子与黏粒、分形维数呈极显著正相关,与极细沙粒、细沙粒呈极显著负相关。在440—500 cm层,黏粒与SWC、SOC呈极显著负相关,与TN、TK呈极显著正相关;粉粒与SWC、SOC呈极显著正相关,与TN、TK呈极显著负相关;分形维数与TP呈显著正相关。

表3 不同深度土壤粒度与各参数间的 Pearson 相关关系

土层深度/cm	因子	平均粒径	分选系数	偏度	峰度	分形维数
0—80	黏粒	0.997**	0.981**	0.633	0.393	0.998**
	粉粒	0.999**	0.961**	0.554	0.456	0.989**
	极细沙粒	-0.999**	-0.965**	-0.539	0.430	-0.990**
	细沙粒	-0.997**	-0.956**	-0.596	-0.482	-0.987**
80—160	黏粒	0.272	0.963**	0.688	0.256	0.944**
	粉粒	0.273	-0.959**	-0.492	0.269	-0.655
	极细沙粒	-0.415	0.905*	0.403	-0.408	0.536
	细沙粒	-0.759	0.609	0.298	-0.639	0.175
160—240	黏粒	0.997**	-0.974**	0.424	0.434	0.993**
	粉粒	0.977**	-0.886	0.299	0.297	0.985**
	极细沙粒	-0.986**	0.907*	-0.315	-0.315	-0.992**
	细沙粒	-0.919**	0.784	-0.305	-0.294	-0.934*
240—300	黏粒	0.959**	-0.364	0.744	-0.226	0.847*
	粉粒	-0.959**	0.368	-0.075	0.222	-0.845*
	极细沙粒	-0.940**	0.309	-0.746	0.282	-0.877**
	细沙粒	0	0	0	0	0
300—420	黏粒	0.538	0.847*	0.776	-0.182	0.943**
	粉粒	0.978**	-0.165	0.016	-0.352	0.503
	极细沙粒	-0.568	-0.826*	-0.569	0.173	-0.881*
	细沙粒	-0.880*	0.444	0.180	0.313	-0.212
420—440	黏粒	0.965**	-0.839	-0.405	0.792	-0.041
	粉粒	-0.965**	0.839	0.406	-0.792	0.041
	极细沙粒	0	0	0	0	0
	细沙粒	0	0	0	0	0
440—500	黏粒	0.943*	0.108	0.998**	0.593	0.136
	粉粒	-0.663	-0.961*	-0.423	-0.969*	-0.968*
	极细沙粒	-0.728	-0.932*	-0.504	-0.987**	-0.942*
	细沙粒	0.728	0.932*	0.504	0.988**	0.943*

注:\*表示 $p < 0.05$ ; \*\*表示 $p < 0.01$ 。

### 3.5 土壤粒度组成的影响因素分析

基于 db-RDA 分析的土壤粒度与环境因子关系的结果见表5和图5。第1轴和第2轴解释土壤粒度及参数与环境因子之间关系的大部分信息。第1轴和第2轴分别解释土壤粒度组成87.324%和3.290%的变量,解释土壤粒度组成与环境因子之间关系96.089%和3.621%的变量(表5)。

各因子箭头所指的方向大致相同,表明具有显著的正相关<sup>[3]</sup>。根据箭头长度及夹角,土壤含水量、pH、全磷、土壤有机质及电导率对土壤养分及化学计量的影响依次减弱;且所有因子均位于第1轴右侧,

与黏粒、粉粒、平均粒径呈正相关,与沙粒呈负相关(图5)。综合分析表明,怪柳沙包的土壤粒度形成受土壤含水量、pH、全磷、有机质及电导率的影响。

## 4 讨论

### 4.1 怪柳沙包的土壤粒度分布特征

土壤粒度分布特征是影响土壤物理特性的重要因素之一,不仅能够反映土壤颗粒的组成及大小,而且对土壤侵蚀、水分运动及土壤肥力等有不同程度的影响<sup>[2-3]</sup>。已有研究<sup>[22]</sup>认为,粒度 $< 100 \mu\text{m}$ 的颗粒在大风中的运动可能接近于悬移状态,但仅有粒度 $< 50 \mu\text{m}$ 的黏粒和粉粒能够被风长距离悬移;而粒度

在 100~150  $\mu\text{m}$  的沙粒主要以跃移方式运动, 粒度在 500  $\mu\text{m}$  以上的沙粒可进行表层蠕移。

本研究中, 桤柳沙包的土壤粒度组成以粉粒和极细沙粒为主, 表明该区域桤柳沙包的土壤颗粒是

通过风力搬运堆积到灌丛下, 由于桤柳灌丛能够有效降低风速, 使部分悬移运动的细粒物质通过灌丛的阻挡发生沉降, 从而使粉粒等细粒物质在灌丛下大量堆积<sup>[5]</sup>。

表 4 土壤粒度组成与环境因子之间的 Pearson 相关关系

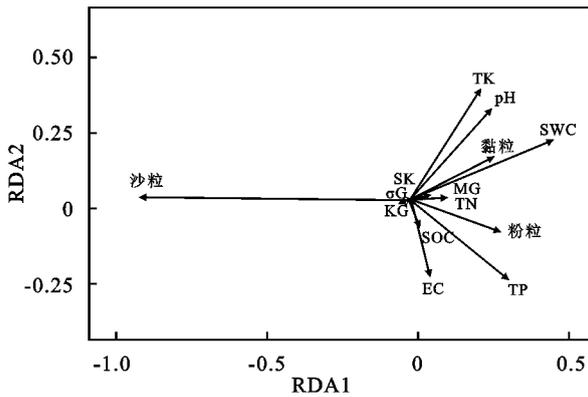
土层深度/cm	因子	SWC	pH	EC	SOC	TN	TP	TK
0—80	黏粒	-0.754	0.764	0.572	0.196	-0.311	0.949**	-0.849
	粉粒	-0.701	0.829	0.500	0.108	-0.389	0.949**	-0.788
	极细沙粒	0.717	-0.829	-0.517	-0.085	0.413	-0.911*	0.789
	细沙粒	0.685	-0.811	-0.488	-0.168	0.331	-0.943*	0.800
	分形维数	-0.795	0.743	0.621	0.182	-0.325	0.938*	-0.866
	黏粒	-0.771	-0.928*	0.983**	0.822	0.755	0.609	0.473
80—160	粉粒	0.461	0.611	-0.805	-0.595	-0.699	-0.304	-0.834
	极细沙粒	-0.342	-0.488	0.711	0.501	0.649	0.194	0.895
	细沙粒	-0.115	-0.032	0.297	0.017	0.229	0.058	0.829
	分形维数	-0.921*	-0.942*	0.915*	0.738	0.571	0.807	0.162
	黏粒	-0.059	0.916*	-0.273	-0.728	-0.715	-0.746	-0.659
	粉粒	0.168	0.990***	-0.524	0.887*	0.877*	0.841*	-0.437
160—240	极细沙粒	-0.123	-0.982**	0.483	-0.864*	-0.854*	-0.833*	0.480
	细沙粒	-0.357	-0.989**	0.647	-0.938*	-0.930*	0.805	0.267
	分形维数	0.003	0.954**	-0.376	-0.799	-0.788	-0.813	-0.585
	黏粒	0.979**	0.950**	0.850*	-0.172	0.121	-0.494	0.868*
	粉粒	-0.951**	-0.925*	-0.831	0.129	-0.117	0.458	-0.847
	极细沙粒	0	0	0	0	0	0	0
240—300	细沙粒	0	0	0	0	0	0	0
	分形维数	0.935*	0.639	0.441	-0.663	-0.424	-0.879*	0.472
	黏粒	-0.704	0.043	0.561	0.444	-0.161	0.958**	0.036
	粉粒	-0.713	-0.538	0.794	0.363	0.351	0.474	0.900*
	极细沙粒	0.755	0.229	-0.727	-0.663	-0.131	-0.882*	-0.049
	细沙粒	0.540	0.527	-0.639	-0.192	-0.357	-0.230	-0.961**
300—420	分形维数	-0.725	0.056	0.577	0.276	-0.182	0.965**	0.279
	黏粒	0.984**	0.994***	0.991***	0.951*	0.992***	0.974**	0.991***
	粉粒	-0.762	-0.623	-0.623	-0.449	-0.621	-0.653	-0.543
	极细沙粒	-0.981**	-0.988**	-0.998***	-0.987**	-0.978**	-0.998***	-0.968**
	细沙粒	-0.975**	-0.961**	-0.971**	-0.999***	-0.971**	-0.974**	-0.951**
	分形维数	0.999***	0.996***	0.989**	0.978**	0.972**	0.997***	0.993***
420—440	黏粒	-0.994***	0.913*	0.285	-0.994***	0.992***	0.326	0.993***
	粉粒	0.994***	-0.925*	-0.287	0.990***	-0.993***	-0.324	-0.993***
	极细沙粒	0	0	0	0	0	0	0
	细沙粒	0	0	0	0	0	0	0
	分形维数	0.035	0.001	0.847	0.035	0.099	0.926*	0.005

注: \* 表示  $p < 0.05$ ; \*\* 表示  $p < 0.01$ ; \*\*\* 表示  $p < 0.001$ ; SWC 为土壤水分含量; EC 为电导率; SOC 为土壤有机质; TN 为全氮; TP 为全磷; TK 为全钾。

表 5 基于 db-RDA 分析前的不同土层深度粒度分布的特征值和累积贡献比率

变量	F 值	p 值	结果	RDA1	RDA2
pH	39.547	0.001***	特征根	0.071	0.003
EC	73.073	0.001***	土壤粒度分布的解释比例	87.324	3.290
SWC	26.754	0.001***	土壤粒度与环境因子关系的解释比例	96.089	3.621
TN	3.104	0.085	F 值	172.311	6.492
TP	20.856	0.001***	p 值	0.001***	0.232
TK	1.917	0.170			
SOC	4.108	0.049*			

注: \* 表示  $p < 0.05$ ; \*\* 表示  $p < 0.01$ ; \*\*\* 表示  $p < 0.001$ 。



注:SWC为土壤水分含量;EC为电导率;SOC为土壤有机质;TN为全氮;TP为全磷;TK为全钾;MG为平均粒径; $\sigma$ G为分选系数;SK为偏度;KG为峰态;D为分形维数。

图5 基于db-RDA分析的土壤粒度及参数与环境因子之间的关系

0—300 cm层土壤黏粒、粉粒、平均粒径及分形维数随土层深度的增加而升高,而极细沙粒和细沙粒含量随土层深度的增加而降低(表1),表明随着怪柳沙包的增高,土壤粒度组成相对变粗,这可能与怪柳沙包形成过程中不同时期沉积物来源、风速及怪柳灌丛大小等因素密切相关。随着怪柳沙包的增高发育,悬移颗粒由于受怪柳灌丛的阻挡而沉积于灌丛下,从而使细颗粒物在灌丛下大量堆积,这也解释了为什么该区域怪柳沙包土壤主要由粉粒和极细沙粒组成的原因<sup>[1-2]</sup>。此外,由于本研究所选的怪柳沙包平均高度约为2.5 m,相对怪柳沙包来说,本研究所采240—260 cm层土样约为怪柳灌丛初始生长于该区域的地平面土壤;在历史时期该区域由古河道冲积演变形成,由于受洪水冲积的影响,在地表形成一层由细颗粒物组成的板结土层,这也是240—300 cm层土壤主要由黏粒和粉粒组成的原因所在。而在300—420 cm层土壤黏粒和粉粒含量最低,沙粒含量最高(表1),这主要是由于在300—420 cm层形成了由粉粒和沙粒组成的“悬湿沙层”,该层的形成可能与古尔班通古特沙漠地区的风沙侵蚀密切相关。此外,该层主要位于怪柳沙包的地平面以下,为怪柳灌丛的早期生长提供了良好的水分条件。在420 cm层以下,土壤黏粒和粉粒含量呈升高趋势,而沙粒含量逐渐消失,这可能主要是由于历史时期受古河道河流冲洪积的影响,导致细颗粒物在河道底部沉积。

#### 4.2 怪柳沙包土壤粒度与分形维数之间的关系

土壤作为一种具有分形特征的复杂系统,分形几何常用于土壤粒度分形维数的研究。土壤粒度分形维数既可反映土壤颗粒分布及质地的均匀程度,也可反映土壤发生及土壤肥力对质地的影响<sup>[23]</sup>。怪柳沙包作为沙漠地区独特的生物地貌景观,其土壤特征是一个典型的分形几何体,分形维数的大小可反映怪柳

沙包土壤的自相似规律。已有研究<sup>[3]</sup>表明,土壤粒度分形维数与黏粒、粉粒呈正相关,与沙粒呈负相关。本研究也得出相似的研究结果,土壤粒度分形维数与黏粒、粉粒呈极显著正相关,与极细沙粒、细沙粒呈极显著负相关(图3),表明土壤粒度分形维数能够较好地反映怪柳沙包的颗粒粗细状况,且分形维数随黏粒及粉粒含量的增加而增大,随着极细沙粒、细沙粒含量的增加而减小,因此,可用分形维数反映怪柳沙包土壤受风沙影响的程度。在古尔班通古特沙漠,由于风沙活动较为强烈,怪柳沙包的土壤颗粒易受风速及沙源的影响。本研究中,0—300 cm层土壤分形维数随土层深度的增加而增大,说明怪柳沙包表层土壤易受风力及沙物质组成的影响,随着怪柳沙包的增高,黏粒和粉粒等细颗粒物受风沙侵蚀的影响可能被选择性地移出,从而使表层土壤颗粒呈逐渐粗化的趋势。因此,分形维数可较好地反映风沙侵蚀作用下土壤颗粒的损失状况,即分形维数越大,细颗粒物含量越高,土壤风蚀程度越弱,反之亦然。

#### 4.3 怪柳沙包土壤粒度组成的影响因素

在干旱沙漠环境,地表物质组成是风与下垫面之间长期作用的结果,并主要取决于风况和源区沙物质组成<sup>[5]</sup>。因此,土壤粒度特征不仅是风力对源区物质搬运和分选作用的反映,同时也体现障碍物对风沙流运移的影响。本研究中,沙包上怪柳盖度约为50%,表层土壤粒度组成以细颗粒物占绝对优势,这主要是由于怪柳灌丛个体相对较大,密集的枝条及柔软的同化枝有利于截获部分悬浮运动的细颗粒物。此外,本研究中土壤粒度组成主要集中在50  $\mu$ m以下(图2),表明土壤颗粒大部分处于悬浮运动的粒度范围,所以推断沙尘天气可能将一部分悬移物质远程输送到研究区域。土壤颗粒组成也受气候、地形地貌、植被覆盖及土壤特性等因素的影响<sup>[15]</sup>,李海东等<sup>[24]</sup>研究认为,土壤养分含量随黏粒、粉粒、极细沙粒和细沙粒等土壤细沙物质含量的增加而增加,且土壤黏粒和粉粒含量增加对土壤养分含量增加的贡献较大,极细沙粒和细沙粒对土壤养分增加的贡献较小,而中沙粒的增加降低土壤养分含量。本研究中,怪柳沙包的土壤粒度形成也受土壤含水量、pH、全磷、有机质及电导率的影响,这可能与怪柳沙包土壤中枯落物等的分解密切相关,在降水等环境因素的共同作用下,土壤中枯落物的分解可增加土壤细颗粒物含量及土壤养分含量。已有研究<sup>[25]</sup>表明,土壤粒度分形维数可以用来反映土壤肥力状况,土壤粒度分形维数与土壤养分之间存在显著的相关性,且土壤粒度分形维数与有机

碳、全氮、全磷含量之间呈极显著正相关,这与本研究的结果并不完全一致。本研究中,除 420—440 cm 土层,怪柳沙包土壤分形维数与土壤养分含量之间没有明显的相关性,表明土壤分形维数不能很好地反映怪柳沙包土壤的肥力状况。

沙漠—绿洲过渡带怪柳沙包能够有效拦截和固定大量的风蚀物质,是一个天然的流沙防治系统,同时怪柳沙包也是一种不稳定的生物地貌类型,在植被大量破坏和强烈风蚀作用下易于衰败和退化。因此,维持一定的植被覆盖是怪柳沙包保持稳定的前提。随着全球气候变化的影响,古尔班通古特沙漠地区降水量呈增加趋势,降水的增加有利于植被的生长及土壤结构的稳定。此外,由于怪柳灌丛对风沙物质的拦截作用及怪柳沙包上植被盖度相对较高,使该地区的怪柳沙包发育相对较为稳定。然而,由于人为对怪柳沙包的开发利用,导致该地区荒漠—绿洲过渡带部分区域有向荒漠化发展的趋势,这可能会导致风沙入侵的加剧,从而造成区域环境的退化。因此,怪柳沙包的形成阻止沙漠向绿洲的蔓延,怪柳沙包土壤粒度组成也是荒漠—绿洲过渡带土壤形成的物质基础,在对怪柳沙包的开发利用中应谨慎,以达到维持区域沙漠生态环境稳定的目的。

## 5 结论

(1)古尔班通古特沙漠地区怪柳沙包土壤粉粒含量最高,其次为极细沙粒,两者含量达到 80% 以上,且 50  $\mu\text{m}$  以下土壤粒度含量在 57% 以上,表明细粒物质是怪柳沙包土壤粒度组成的主要成分。

(2)随着土层深度的增加,黏粒、粉粒、平均粒径及分形维数总体呈先升高后降低再升高的变化,极细沙粒、细沙粒及分选系数总体呈先降低后升高再降低的变化趋势,粒度频率分布曲线的波峰呈先升高后降低再升高的变化趋势。土壤剖面总体分选性较差,偏度呈正偏态,峰态呈中等峰态。从 0—80 cm 到 440—500 cm 层,粒度频率分布曲线波峰分别出现在 42.42, 22.32, 20.05, 9.48, 58.49, 30.78, 5.55  $\mu\text{m}$ 。

(3)分形维数、平均粒径与黏粒及粉粒呈显著正相关,与极细沙粒、细沙粒呈显著负相关,怪柳沙包土壤粒度形成受土壤含水量、pH、全磷、有机质及电导率的影响。怪柳沙包的形成阻止沙漠向绿洲的蔓延,怪柳沙包土壤粒度组成是荒漠—绿洲过渡带土壤形成的物质基础。因此,在对怪柳沙包的开发利用中应谨慎,以达到维持区域沙漠生态环境稳定的目的。

### 参考文献:

[1] Xu G C, Li Z B, Li P. Fractal features of soil particle-

size distribution and total soil nitrogen distribution in a typical watershed in the source area of the middle Dan River, China[J]. *Catena*, 2013, 101: 17-23.

[2] 毛东雷,蔡富艳,方登先,等.新疆策勒绿洲—沙漠过渡带风沙运动沙尘物质粒径分形特征[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1): 88-99.

[3] 周娜,尤源,雷加强,等.毛里塔尼亚努瓦克肖特沙丘粒径分布特征及其环境意义[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(2): 252-261.

[4] 王永兵,李亚萍.古尔班通古特沙漠南缘梭梭固沙林土壤粒度的分异规律[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(3): 75-80.

[5] Jia W R, Zhang C L, Li S Y, et al. Grain size distribution at four developmental stages of crescent dunes in the hinterland of the Taklimakan Desert, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(5): 722-733.

[6] 赵明月,赵文武,刘源鑫.不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因子:以黄土丘陵沟壑区为例[J]. *生态学报*, 2015, 35(14): 4625-4632.

[7] Gao G L, Ding G D, Wu B, et al. Fractal scaling of particle size distribution and relationships with top soil properties affected by biological soil crusts[J/OL]. *PLoS One*, 2014, 9. DOI: 10.1371/journal.pone.0088559.

[8] Deng Y S, Cai C F, Xia D, et al. Fractal features of soil particle size distribution under different land-use patterns in the alluvial fans of collapsing gullies in the hilly granitic region of southern China[J/OL]. *PLoS One*, 2017, 12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173555>.

[9] 徐加盼,李继洪,魏玉杰,等.不同母质类型发育土壤颗粒组成分形特征[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1197-1205.

[10] 代豫杰,李锦荣,郭建英,等.乌兰布和沙漠不同灌丛土壤颗粒多重分形特征及其与有机碳分布的关系[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(7): 1069-1078.

[11] Nemes A, Rawls W J. Soil texture and particle-size distribution as input to estimate soil hydraulic properties. In: Pachepsky YA, Rawls WJ (eds) *Development of pedotransfer functions*[J]. Elsevier, Amsterdam in *Soil Hydrology*, 2004, 30: 47-70.

[12] 赵元杰,夏训诚.新疆罗布泊红柳沙包与环境研究[M]. 北京:科学出版社, 2011: 38-142.

[13] 潘光耀,穆桂金,岳健,等.2001—2010 年策勒绿洲—沙漠过渡带的变化及其成因[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(1): 169-175.

[14] 董正武,玉米提·哈力克,李生字,等.古尔班通古特沙漠西南缘怪柳沙包的土壤化学计量特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(20): 7389-7400.

[15] 刘进辉,王雪芹,马洋,等.沙漠绿洲过渡带怪柳灌丛沙堆—丘间地系统土壤粒度分异规律[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(11): 89-99.

- 工程学报, 2000, 16(4): 32-36.
- [3] Laffan J M, Lane L J, Foster G R, et al. WEPP: A new generation of erosion prediction technology[J]. The Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46(1): 34-38.
- [4] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(6): 527-544.
- [5] De Roo A P J. The LISEM project: An introduction[J]. Hydrological Processes, 1996, 10(8): 1021-1025.
- [6] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M]. Washington, D. C.: U.S. Department of Agriculture, 1978.
- [7] Renard K G, Foster G R, Weeies G A, et al. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)[M]. Washington D. C.: U.S. Department of Agriculture, 1997.
- [8] Zhao G J, Mu X M, Wen Z, et al. Soil erosion, conservation and eco-environment changes in the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation and Development, 2013, 24(5): 499-510.
- [9] 刘宇林. 黄土高原土壤侵蚀对植被恢复的响应[D]. 陕西杨凌: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2020.
- [10] 陆建忠, 陈晓玲, 李辉, 等. 基于GIS/RS和USLE鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 337-344.
- [11] 穆兴民, 李鹏飞, 高鹏, 等. 土壤侵蚀模型在黄土高原的应用述评[J]. 人民黄河, 2016, 38(10): 100-110.
- [12] 江忠善, 郑粉莉, 武敏. 中国坡面水蚀预报模型研究[J]. 泥沙研究, 2005(4): 1-6.
- [13] 刘宝元, 谢云, 张科利, 等. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [14] 田鹏, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于改进RUSLE模型的皇甫川流域土壤侵蚀产沙模拟研究[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 832-840.
- [15] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [16] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.
- [17] Sharply A N, Williams J R, Jones C A, et al. Erosion-productivity impact calculator EPIC: Model documentation[R]. Washington D. C.: USDA Technical Bulletin 1768, 1990.
- [18] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [19] Liu B Y. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [20] 王晗生, 刘国彬. 植被结构及其防止土壤侵蚀作用分析[J]. 干旱区资源与环境, 1999, 13(2): 63-69.
- [21] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24.
- [22] 秦伟. 北洛河上游土壤侵蚀特征及其对植被重建的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [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]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [24] 吴发启, 张玉斌, 王健. 黄土高原水平梯田的蓄水保土效益分析[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 34-37.
- [25] 中华人民共和国水利部. SL 190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 3-12.
- (上接第72页)
- [16] 董正武, 赵英, 雷加强, 等. 塔克拉玛干沙漠不同区域柽柳沙包土壤盐分分布特征及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2018, 42(8): 873-884.
- [17] 丁改改, 蒋进, 宋春武, 等. 古尔班通古特沙漠人工梭梭林群落生态特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(10): 1423-1432.
- [18] 王瑞东, 高永, 党晓宏, 等. 近自然恢复状态下荒漠草原不同群落表土粒度特征研究[J]. 草地学报, 2019, 27(5): 1309-1316.
- [19] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27(1): 3-26.
- [20] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 362-369.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] Lin Y C, Mu G J, Xu L S, et al. The origin of bimodal grain-size distribution for aeolian deposits[J]. Aeolian Research, 2016, 20: 80-88.
- [23] 李学斌, 张义凡, 陈林, 等. 荒漠草原典型群落土壤粒径和养分的分布特征及其关系研究[J]. 西北植物学报, 2017, 37(8): 1635-1644.
- [24] 李海东, 沈渭寿, 邹长新, 等. 雅鲁藏布江南宽谷风沙化土地土壤养分和粒径特征[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 4981-4992.
- [25] 陶冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠4种草本植物叶片与土壤的化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 659-665.