

塔克拉玛干沙漠土壤粒度分布特征及其对粉尘释放的影响

杨兴华¹, 康永德¹, 周成龙¹, 霍文¹, 杨帆¹,
潘红林¹, 孟露¹, 何清^{2*}

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002; 2. 新疆气象局, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 塔克拉玛干沙漠是中国西北的重要粉尘源区, 研究区域粒度分布特征及粉尘释放量有助于评估区域大气环境质量及其气候效应。基于此, 按照空间分布特征及下垫面类型(农田、沙丘、荒漠)环塔克拉玛干沙漠采集地表土壤样品138个, 利用 Mastersizer2000 激光粒度仪分析土壤粒度组成, 利用 DPM 模型计算粉尘释放通量, 以期揭示塔克拉玛干沙漠地表土壤微团粒粒度分布特征及其对粉尘释放通量的影响, 研究结果表明: 1) 138 个样品中流动沙丘和沙垄的粉砂和黏粒含量累计之和最少, 约占 10%~18%左右, 属于砂质土和砂壤质土。农田(绿洲、林带区)样品多为草甸土, 粉砂和黏粒累计含量约占 50%~80%, 戈壁(荒漠区)样品中粉砂和黏粒的含量差异较大, 砂质土和砂壤土的粉砂和黏粒的含量累计之和约占 20%~30%。2) 地表土壤微团粒中粒径较小的是细砂和粉细砂, 可用 3 个对数正态分布群体表示, 即: 粉细砂群体、细砂群体、粗砂群体, 中值粒径依次为 90、225、500 μm , 标准偏差分别为 1.02、1.53、1.08, 各占比例约为 30%、49%、21%。3) 塔克拉玛干沙漠粉细砂和细砂的粉尘释放量最大, 中砂粗砂次之, 极粗砂最少, 其最大差值的数量级为 $10^{-2} \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。研究结果可以较好地反映不同下垫面粉尘释放差异, 对定量评估区域乃至全疆的粉尘释放量等具有重要意义。

关键词: 粉尘; 粒度; 侵蚀; 土壤; 释放

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.019

中图分类号: X169

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-05-0167-08

杨兴华, 康永德, 周成龙, 霍文, 杨帆, 潘红林, 孟露, 何清. 塔克拉玛干沙漠土壤粒度分布特征及其对粉尘释放的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 167-174. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.019
<http://www.tcsae.org>

Yang Xinghua, Kang Yongde, Zhou Chenglong, Huo Wen, Yang Fan, Pan Honglin, Meng Lu, He Qing. Characteristics of soil particle size distribution and its effect on dust emission in Taklimakan Desert[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(5): 167-174. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.019
<http://www.tcsae.org>

0 引言

粉尘作为地球气候系统中的重要因子, 其产生和传输对气候、生态系统及人类活动都有着重要的影响。干旱半干旱区分布着塔克拉玛干沙漠等一系列沙漠戈壁区, 是地球上最重要的粉尘释放源区之一^[1], 对其内风蚀物释放的粉尘进行研究, 在反演塔克拉玛干沙漠粉尘源区的沙尘暴历史和作为粉尘远程传输有着独特的优势。已有的观测和数值模拟研究显示, 粉尘循环过程受控于大气环流、地形、地貌和下垫面特征等诸多因子^[2], 粉尘的释放对下风向地区的空气质量和生态环境有很大的影响^[3]。国内外学者在此研究领域也取得了一系列代表性成果^[4-7]。车慧正等^[8]模拟了中国沙漠地区不同下垫面的粉尘释放通量, 梅凡民等^[9]研究了毛乌素沙地裸露沙质地表

的粉尘释放通量。地表特征, 植被盖度、土壤黏土含量、土壤含水量等均影响粉尘的释放过程^[10]。人类活动大大加剧了土地荒漠化过程^[11], 不仅改变土壤表层原始结构, 还破坏颗粒间的结合强度。在地表土壤破坏的条件下^[12], 沙尘才得以脱离, 形成粉尘释放源, 产生更多的易释放粉尘通量^[13]。粒度特征蕴含丰富的地表过程信息, 常被用来反映土壤风蚀、沙丘形态及沙尘暴等^[14-15]。土壤风蚀形成的沉积物也含有不同粒级的粉尘物质^[16], 粒度分析不仅是认识风成沉积物的基础, 也是研究风沙地貌演变的基本手段^[17]。Robert 等^[18-19]对沙丘不同下垫面的粒度特征进行了详细探讨, 也有学者对农田等不同地表形态风蚀物的粒度特征进行了研究^[20]。利用粒度分布特征, 还可通过风蚀区可蚀性与非可蚀性颗粒的相对含量变化来估算区域的粉尘释放通量^[21]。王仁德等^[22]基于粒度组成变化, 提出了一种估算粉尘释放量的新方法。不同下垫面的粉尘释放量约差 10 倍左右^[23]。粉尘输送再搬运对粒度组成有非常重要的影响, 美国科罗拉多东部粉尘大约只有 30%的颗粒粒径小于 $8 \mu\text{m}$ ^[24], 说明距离粉尘源区更近, 分别由砂黄土(众数粒径 $63 \mu\text{m}$)、粉砂黄土(众数粒径 $37 \mu\text{m}$)和黏粒黄土(众数粒径 $22 \mu\text{m}$) 3 个组分

收稿日期: 2019-03-03 修订日期: 2020-01-17

基金项目: 中国气象沙漠科学基金“地表土壤粒径谱对起沙通量模拟结果的影响”(sqj2018019), 国家自然科学基金(41875019)资助

作者简介: 杨兴华, 副研究员, 研究方向为风沙物理。

Email: yxhidm@126.com

*通信作者: 何清, 研究员, 博士, 研究方向为沙漠气象。

Email: qinghe@idm.cn

构成, 粒度较粗地反映了粉尘释放过程中跃移和悬移局地搬运的组分, 黏粒代表了由大气背景粉尘和由远源提供的尘暴细颗粒, 从侧面反映出粒度风尘物质对局地大气粉尘载荷具有明显贡献。

因土壤风蚀而产生粉尘释放及塔克拉玛干沙漠粒度特征的研究成果已较多, 但对粉尘释放通量估算及粒度特征对粉尘释放的相关影响机制仍然不清楚^[25-26]。为此, 本研究收集了塔克拉玛干沙漠及周边区域不同下垫面的土壤样品 138 个, 对其进行分析, 探讨各个下垫面的粒度参数及分布特征, 阐明粒度与粉尘释放通量间的关系, 认清不同土壤质地和地表类型下粉尘释放的物理过程, 为解释不同下垫面粉尘释放形成的过程提供理论支撑, 同时为该区风沙灾害防治及环境保护提供技术支撑。

1 研究区概况

塔克拉玛干沙漠地处塔里木盆地中心 (83°39'E, 38°58'N), 东西长 1 200 km 左右, 南北宽 600 km 左右, 面积约 34 万 km², 是世界第二大流动性沙漠。主要以流动沙丘为主, 占沙漠总面积的 84%, 地表由流沙覆盖, 植被覆盖率极低且种类贫乏, 群落结构简单。地貌以沙丘地貌为主, 沙丘地貌表现为一系列线状的高大复合型纵向沙垄与垄间地相间分布, 沙垄走向为 NNE-SSW 或 EN-SW 方向, 相对高度为 40~50 m。垄间平坦低地宽 1~3 km, 长 2~5 km。高大沙垄的前缘分布有低矮的新月形沙丘和沙丘链^[27]。根据塔中气象站多年整编观测资料显示, 塔中地区年平均蒸发量达 3 800 mm, 而年平均降水量仅 26 mm^[28]; 大风和沙尘是这里的主要天气现象, 年平均沙尘暴天数为 16 d^[29], 年平均沙尘指数高达 235^[30]。

2 资料与方法

2.1 样品采集与测试

于 2015 年 3 月至 4 月, 环塔克拉玛干沙漠腹地及周边农田、林带区采取表土样品 138 个, 位置如图 1 所示。这些样品是不同类型的地表物质在特定气象条件和植被覆盖下, 逐步发展为表土风蚀和粉尘释放的潜在来源物质。不管从样品空间采集范围, 还是地貌组成类型及地表物质的成份来看, 138 个样品基本能够代表塔里木盆地主要风蚀状况和粉尘释放源区的表土特征, 具有典型性和代表性。138 个样品的采集区域按照空间分布特征及下垫面类型划分为农田和林带区 (主要为草甸土和盐土, 18 个样品)、沙丘和沙垄区 (主要为风沙土, 93 个样品)、荒漠和戈壁区 (主要为灰棕漠土, 27 个样品), 需要说明的是由于沙丘和丘间地可能具有不同物质来源, 所以在考虑沙样物源取样时对沙丘和丘间地分别进行取样, 即采样部位选择在沙丘顶部、起伏沙丘的上部、起伏沙丘的下部, 平坦沙地等采集。借助 Udden-Wentworth 粒级划分原则^[31]对 138 个不同下垫面沙样的粒级百分含量进行统计分析。为保证样品粒径均在 Mastersizer2000 激光粒度分析仪 (0.02~2 000 μm) 量程之内, 各种下垫面的样品采集均刮去表层 2~3 mm 的浮土 (主要是剔除表层粒径大于 2 mm 的土样, 以免造成测量误差), 用小铁铲垂直入土到需要深度, 由上而下每 5 cm 采集 1 个样品, 采集 3 组, 确保同一深度和土质质量的一致性, 将其中的杂物去除, 石砾、根系等物全部筛出, 在塑料自封袋上注明日期、编号、采样地点、采样深度、土样名称等, 带回中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所树木年轮重点实验室测试。

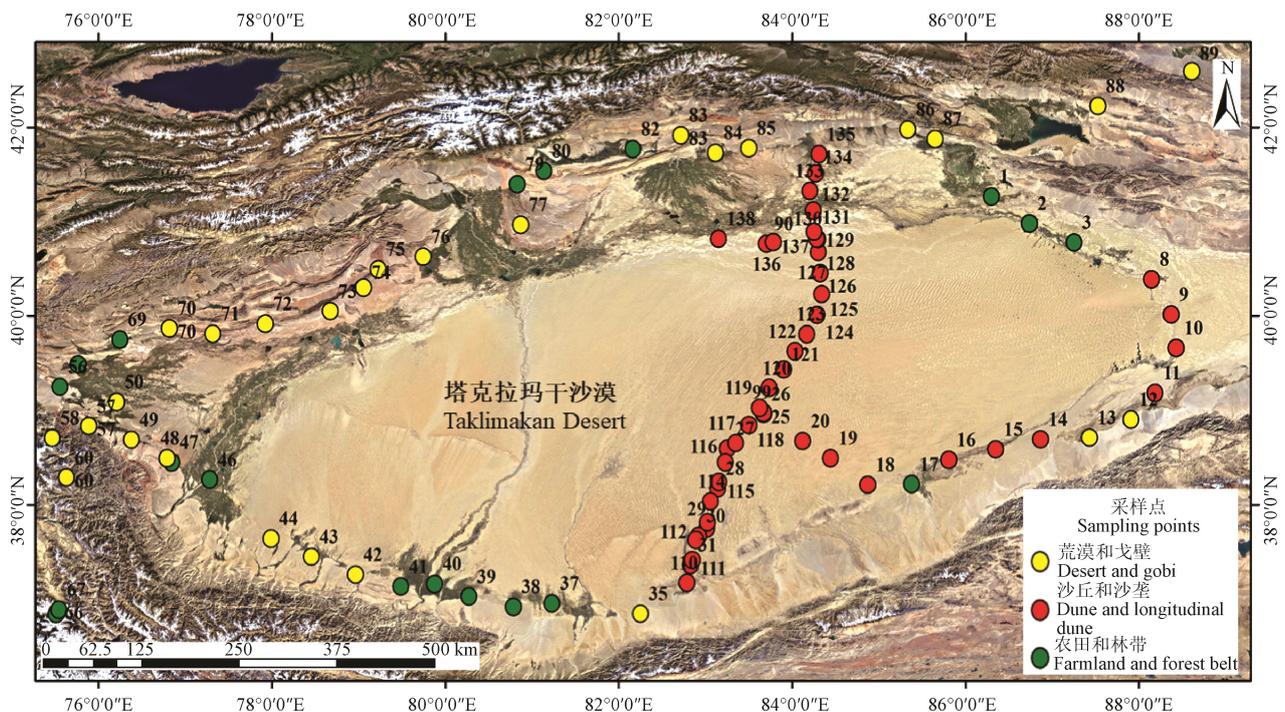


图 1 塔克拉玛干沙漠采样位置
Fig.1 Sampling sites in Taklimakan Desert

粒度测试在 Mastersizer2000 激光粒度分析仪(0.02~2000 μm) 上进行^[31]。在上机测试前, 将采集的样品在自然条件下风干, 每个样品取约 0.5 g 放入烧杯, 加入 10 mL 浓度为 30% 的 H_2O_2 煮沸约 30 min, 去除有机质, 然后加入 10 mL 浓度为 10% 的稀 HCL, 去除碳酸盐, 再加入蒸馏水烧至满杯, 静置 24 h 后用医用针管抽取上层水, 加浓度为 0.05 mol/L 的 NaPio6 约 10 mL 做分散剂, 在超声波振荡器上振荡 10 min 左右。为保证所有颗粒均在仪器量程范围之内, 将样品中大于 2 mm 的砾石筛除, 需要说明的是, 剔除 2 mm 的砾石后, 沙粒中仍保留 2 mm 的砾石, 在同一测试标准下最大限度地保留了样品的粒级分布特征。此外, 2 mm 的砾石几乎不可能被风力搬运, 只能由水动力长距离搬运, 如果沙漠沉积物中含有该粒级, 则可以直接判为由于洪水搬运所致, 因此, 剔除 2 mm 的砾石对本文分析结果影响不大。对每一份样品重复测试 3 次, 相对误差小于 2%, 并取 3 次测试结果的平均值作为该样品的粒级数据。采用对数正态分布模型对数据进行拟合^[32], 根据实测数据通过调整对数正态分布的统计参数, 用实测数据来拟合对数正态曲线, 以最小二乘法中的最小残差检验拟合效果。简言之, 把任何土壤微团粒粒度分布均可表示为几个对数正态分布的组合, 各个对数正态分布可以用中值粒径、标准偏差及各自在对数正态分布中所占的比例等参数描述, 通过调整这 3 个参数保证每个粒级的拟合结果与实测结果残差最小, 效果最优, 拟合方程见文献^[33]。

2.2 摩阻风速的计算

每年的 2—7 月是沙尘暴发生较为集中的月份, 本研究选取塔克拉玛干沙漠腹地的肖塘和塔中两地进行粗糙度及摩阻风速的观测, 采用 CR1000-2M 型数据采集器, 收集 0.5、1、2、4、10 m 处的风速, 频率为 30 min 一组, 每分钟得到超过 20% 以上的数据称为分钟值, 每分钟少于 50% 的数据时, 记录为缺测。由于 0.5 和 1 m 两层风速数据不完整, 将其剔除, 因此文中主要用 2、4 和 10 m 3 层的风速数据。

粗糙度的大小反映了土壤气流接近地表降低的快慢程度, 是指风速等于零的某一几何高度随地表粗糙程度变化的常数, 和空气的层结情况有关。对于固定的地研究区而言, 若其他性质一定的情况下, 粗糙度 y_0 通常可以假设是一个常数^[34-35]。它可以直接通过对数公式计算得出, 即已知 2 个高度的风速, 可以根据:

$$\lg y_0 = \frac{\lg y_2 - \frac{u_2}{u_1} \lg y_1}{1 - \frac{u_2}{u_1}} \quad (1)$$

式中 u_1 、 u_2 为高度 y_1 、 y_2 处的风速。根据试验测得试验区 2 个不同高度的数据代入式, 计算得出该区域粗糙度。

风是沙子发生运动的动力因素, 风沙运动是一种贴近地面的气流对沙粒搬运的现象, 近地面风的运动遵循的对数规律分布

$$u = \frac{u^*}{k} \ln \frac{y}{y_0} \quad (2)$$

式中 u^* 为摩阻风速, m/s; k 为冯卡门常数, 通常取 0.4。

摩阻风速的平均值为 2、4、10 m 三个高度摩阻风速计算值的平均。

根据公式可计算出粗糙度和摩阻风速, 得出各级颗粒的运动轨迹, 进而分析不同土壤粒径的运动。

2.3 粉尘释放通量计算

本文用 DPM 模型^[36]来计算塔克拉玛干沙漠的粉尘释放通量(式 3)。DPM 模型主要由跃移通量方程与粉尘释放通量方程组成, 粉尘释放通量和跃移通量跟颗粒动能成正比, 粉尘释放过程可简化为微团粒在风力作用下发生跃移, 跃移过程中由此产生颗粒碰撞, 碰撞时消耗各自的动能, 有动能的大小决定粉尘释放的多少。跃移通量方程在此不再展开说明, 粉尘释放通量方程表达式为

$$F_{dust,i} = \pi \rho_p d_i^3 / 6 \times N_i \quad (3)$$

式中 $F_{dust,i}$ 为第 i 种粉尘粒子的释放通量, $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; ρ_p 为土壤微团粒的平均密度, 一般取 $2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$; d_i 为从第 i 个对数正态分布, 粉尘颗粒的质量中值粒径, μm 。 N_i 为第 i 种粉尘粒子。

3 结果与分析

3.1 不同下垫面土壤粒度特征

如图 2 所示, 沙粒的级配含量可以直接反映土壤风蚀物的主要粒径组以及不同粒径组沙粒的相对含量。沙粒级配不但与自身沙源有关, 也与风蚀颗粒物活动中的搬运与堆积过程密切相关。因研究区常年风沙活动比较强烈, 导致沙样沉积物经历了长期的风选过程, 因此所有样品中流动沙丘和沙垄的粉砂与黏粒含量累计之和最少, 约占 10%~18% 左右, 属于砂质土和砂壤质土。样品编号为 35~90 之间的优势粒级是粉砂和黏粒, 二者百分含量介于 50%~80% 之间, 这部分样品主要是绿洲、农田、林带区域采集的样品, 多属于草甸土, 其实质还是风蚀物中的壤土和黏壤土及粉壤土的组。样品编号为 90~125 之间的样品粒级差异较大, 这是因为采集区是戈壁和荒漠区, 优势粒级呈现“两极分化”现象, 质地属于砂质沙土、砂质沙壤土等。其余样品则为大众分布, 即砂质土和砂壤土的粉粒和黏粒的含量累计之和介于 20%~30% 之间。壤砂土, 粉砂与黏粒的含量之和约占 63%。

由此推断, 沙粒的主要成分为砂质土、壤砂土、砂质沙土及砂壤土, 砂壤土的微团粒以粉砂为主, 然后为沙粒, 黏粒占比最小。表土中粉壤土、黏壤土的主要成份为粉砂和黏粒。从上述样品的组成来看, 基本可以代表塔里木盆地主要的土壤质地类型。通过上述分析看出, 不同比例含量的沙粒粒级在地表以不同的方式被输送, 粉砂和黏粒一般以悬移的方式运动, 细砂和中砂主要以跃移的方式进行运动, 粒径较大的粗砂和极粗砂则以蠕移方式运动。

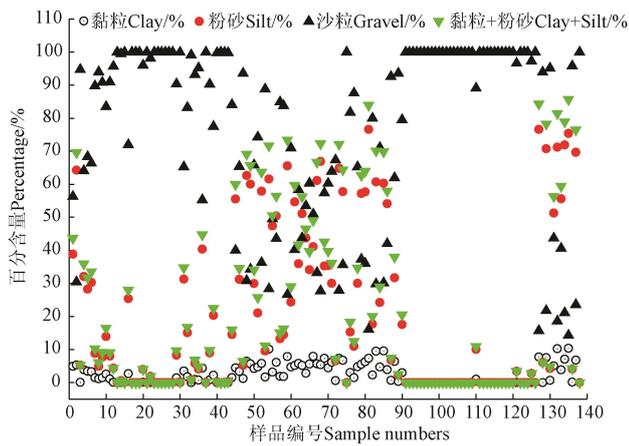


图2 土壤样品百分含量

Fig.2 Percentage of soil samples

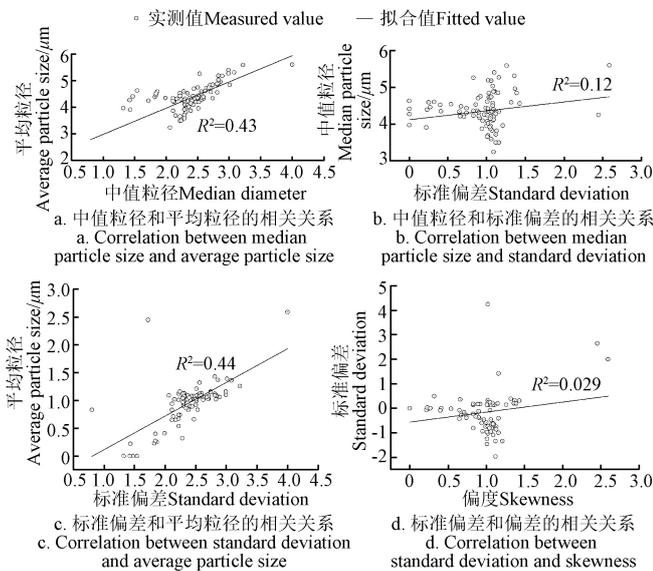


图3 粒度参数间的相关性

Fig.3 Correlation between granularity parameters

受风况、沙源条件和下垫面状况的影响，粒度参数之间的相关关系比较复杂。即使在同一沙漠内，不同区

域、不同沙丘类型的沙丘粒度参数之间的关系也不尽相同^[37]。但对于本文研究的 138 个样品而言，如图 3a~图 3d 所示，除图 3d 偏度与标准偏差，图 3b 标准偏差与中值粒径它们之间相关性较差外，其余所有的粒度参数之间均有明显相关性。平均粒径与标准偏差呈正相关关系（图 3c），相关系数 $R^2=0.44$ ，显著性水平 $P<0.001$ 。平均粒径与分选系数之间的关系进一步说明了沉积物搬运距离越远，平均粒径越小，分选越好。偏度随平均粒径变细而趋于正偏。中值粒径与平均粒径的相关性较好， $R^2=0.43$ ，显著性水平 $P<0.001$ 。偏度与标准偏差，标准偏差与中值粒径，二者之间相关性不明显。

3.2 粒度分布的对数正态模型拟合

通过分析采样区 3 种下垫面的粒径组成，发现样品模拟值和实测值的微团粒粒度分布曲线基本吻合，由此说明，138 个表土样品的微团粒的粒度分布可用对数正态分布模型表示（图 4）。不难发现，农田、沙丘、荒漠和戈壁所采集的样品均可表示为 1~3 个对数正态分布群体（1~3 代表农田、沙丘、荒漠的对数正态分布群体个数）。符合单峰分布的对数正态模型，粒径值依次为：80~150、190~225、200~500 μm 。

从第四纪沉积学角度来看，在地质演变过程中，土壤沙粒经过风力筛选和长期的风蚀作用，使得沉积在地表的残留物质具有较好的分选性，因而，微团粒粒度特征可以表示为 1~3 个对数正态群体的叠加，侧面反映了该类风蚀颗粒物的组成成分单一、分选较优的特点，其特征在塔克拉玛沙漠的粒度样品中表现最为明显。被河流冲刷、风化剥蚀地带的表土及农田土壤，均存在可蚀性极粗砂粒、粗砂粒级的微团粒，同时也包含在残积物上发育的钙质土，经过长时间风蚀和水蚀后，遗留的粗砂、极粗砂颗粒，也有部分细颗粒因黏合而成的粉砂颗粒级的微团粒。由此表明，上述土壤的微团粒粒度分布可以用 3 个对数正态分布群体表示，如表 1 所示。

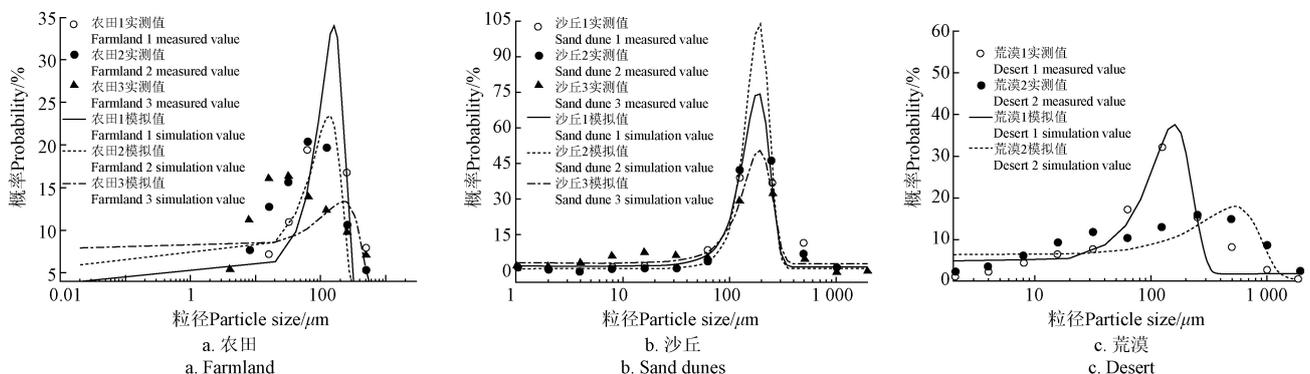


图4 不同下垫面的粒度分布特征

Fig.4 Particle size distribution characteristics of different underlying surfaces

注：农田 1、2、3 分别代表轮耕农田区、林带与农田过渡带区域、农田风蚀区采集的样品；沙丘 1、2、3 分别代表沙丘顶部、沙垄区、平坦沙地采集的样品；荒漠 1、2 分别代表植被稀少的荒漠区、基本无植被且板结的荒漠区采集的样品。
 Note: Farmland 1, 2, and 3 respectively represent samples collected in the wheel tillage farmland area, the forest belt and farmland transition zone, farmland wind erosion areas. The sand dunes 1, 2, and 3 represent samples collected at the top of the dunes, compound longitudinal dunes, flat sandy land. The deserts 1 and 2 represent samples was collected in desert areas with little vegetation, areas without vegetation and soil hardening.

表 1 模拟的微团粒粒度特征

样品类型 Sample types	粒径中值 Median grain diameter/ μm	标准偏差 Standard deviation	质量百分比 Percentage/%
粉细砂群体 Silty sand group	90	1.02	30
细砂群体 Fine sand group	225	1.53	49
粗砂群体 Coarse sand group	500	1.08	21

借助对数正态分布模型对表土样品的粒度参数进行拟合，结果为粉细砂和中细砂及粗砂，可以表示为 3 个对数正态分布群体的组合，粒径大小依次为 90、225、500 μm ，所属样品的标准偏差依次为 1.02、1.53、1.08，上述对数正态分布群体在总体样品中的占比为 30%、49%、21%。

3.3 粒度分布特征及其对粉尘释放通量的影响

图 5 是不同样品微团粒粒度分布的概率。壤土、砂壤土、砂土、粉壤土的微团粒粒度分布和农田、沙丘、荒漠等下垫面的粒度分布相似(由 3.2 节研究结果可知)，可由 1~3 个对数正态分布群体组成，即粉细砂、中砂和粗砂群体组成。每个对数正态分布群体都可用各自的粒度分布参数表示，如中值粒径，标准偏差和百分含量来描述。其质量中值粒径依次为 90、225、500 μm 。虽然，壤土和粉壤土样品也有 3 个对数正态群体组成，但其主要成份并非以砂粒为主，而是粉砂和砂粒的综合为主。其次，砂壤土、砂土和粉壤土样品在质地上有很大差异，但是微团粒粒度分布基本吻合，均可以表示为 3 个对数正态分布群体的组合，从侧面反映出土壤微团粒的粒度分布与土壤质地并非严格对应，即土壤质地只是影响粉尘释放的其中一个因素，不是决定性因素。综上所述，塔克拉玛干沙漠土壤风蚀区的表土样品微团粒粒度分布为 1~3 个对数正态分布群体的组合。模拟的表土微团粒粒度分布参数输入 DPM 粉尘释放模型便可模拟不同地表类型的粉尘释放通量。

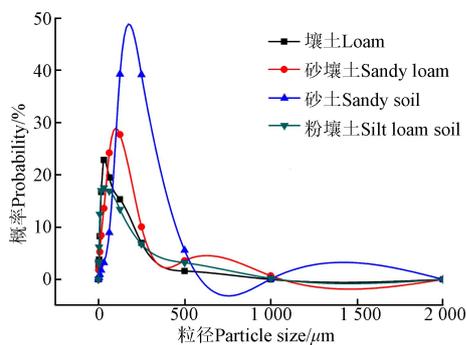


图 5 微团粒粒度分布概率

Fig.5 Probability of micro particle size distribution

由粉尘释放方程可知，与其最为直接的参数之一是摩擦风速(图 6)，当地表摩擦风速超过起动摩擦风速时，便会发生土壤风蚀，进而引起粉尘释放。因塔克拉玛干沙漠环境恶劣，人为活动少，可视为无人干扰条件下满足模型的适用条件。随着摩擦风速的变化，粉尘释放

通量呈波动性变化，差异较为明显，波动大小依次是细砂、粉细砂、粗砂和极粗砂，其中细砂和粉细砂的粉尘释放通量差值约为 $10^{-2} \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，中砂和粗砂次之。当摩擦风速为 0.2 m/s 时，粉尘释放通量最大的为粉细砂，其次为细砂。当摩擦风速在 0.4~1.0 m/s 时，细砂的粉尘释放量达到最大，粉细砂、中砂次之。由此得出，粉细砂和细砂的粉尘释放量最大，中砂粗砂次之，极粗砂最少，其最大差值的数量级为 $10^{-2} \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。由此可见，塔克拉玛干沙漠地表土壤微团粒粒度分布不同，其粉尘释放通量的多寡也不同，进而导致粉尘释放通量呈现明显的差异。

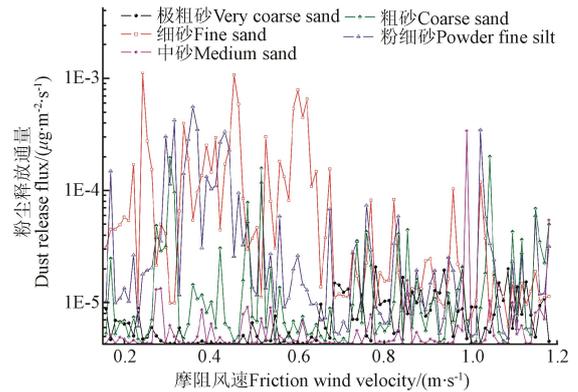


图 6 不同摩擦风速下微团粒粒度分布特征对粉尘释放通量的影响

Fig.6 Effect of micro-particle size distribution characteristics on dust release flux under different frictional wind velocities

4 讨论

由于采集样品数量的限制，样品微团粒粒度分布被表述为 1~3 个对数正态分布群体的组合，后续研究中可以将此特征化的微团粒粒度分布更加精细化，推广至更大的区域，这对大尺度的粉尘释放研究能提供借鉴意义^[26]。由于本文采用的描述表土微团粒粒度分布参数的方法及采样区域的差异，使得此次研究得出的粒度参数还有待今后继续进行试验验证，但是从描述的粒度参数的分布特征而言，它们是很相似的。即使取同一类型的土样，因其二者的粒度分布不同，它们的粉尘释放通量也会有明显的差异，不能简单的套用^[38]。由此可看出，模拟西北干旱区半干旱区的粉尘释放时，找出适合本地土壤微团粒粒度分布参数是十分必要的。

不同的地表属性也是粉尘释放研究中的难点之一^[39]。Sweeney 等^[40]对美国南部选取了 8 种代表性地表(戈壁、干盐湖、远端冲积扇、干河床、沙丘等)对粉尘释放通量进行精细研究发现，干河床和冲积扇等地表的粉尘释放通量范围在 $10^{-3} \sim 10^2 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间，沙丘的粉尘通量为 $10^{-3} \sim 10 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间，盐湖的粉尘通量大致范围为 $10^{-4} \sim 10 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

粉尘释放机制方面，沙漠和农田等区域是粉尘释放的主要源区，但是在此类土壤中，粉沙和黏粒的含量相对偏低，长期的土壤风蚀，粉尘颗粒因此而“耗尽”来抑制粉尘释放通量的可能性比较小，这是因为大气降水中的粉沙和黏粒物质可以形成新的粉尘释放源；沙粒间

的碰撞和磨蚀可以将粗粉砂变成细粉砂,然后为粉尘释放补充,研究发现粉尘释放后的30%会继续重新降落到沙漠中^[40];还有就是风成沙在风蚀过程中被磨蚀也可释放出粉尘粒子^[30]以及沙漠地区本身就是粉尘释放源区^[41]。

尽管DPM模型也存在缺陷,但其优点是输入参数少,容易确定,同时尽可能考虑了地表特征和跃移及冲击过程对粉尘释放的影响,具备明确的物理机制。今后的研究中,借助风洞试验,测量风蚀输运过程中粉尘的释放规律和不同粒径颗粒的空间运动规律,进而分析粉尘的质量流量以及不同粒径颗粒的空间运动与地表颗粒组成之间的相互关系,提出新的更为完善的粉尘释放模型。

5 结论

1) 塔克拉玛干沙漠及周边区域采集的138个样品微团粒粒度分布由1~3对数正态分布群体组合而成,依次是粉细砂群体、细砂群体、粗砂群体,其质量中值和标准偏差及所占比重是模拟塔克拉玛干沙漠不同下垫面粉尘释放通量的关键参数。

2) 模拟结果显示,表土微团粒粒度分布对粉尘释放通量的影响较为显著,差异明显。尤其是粉细砂和细砂的粉尘释放量最大,中砂粗沙次之,极粗砂最少,其最大差值的数量级为 $10^{-2} \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

3) 表土微团粒粒径较小的是细砂和粉细砂,流动沙丘和沙垄的粉砂和黏粒含量累计之和最少,约占10%~18%左右;绿洲,农田、林带样品中粉砂和黏粒累计含量约占50%~80%,砂质土和砂壤土的粉砂和黏粒的含量累计之和约占20%~30%。气象条件等因素相同的情况下,塔克拉玛干沙漠沙丘和流沙覆盖的农田粉尘释放通量大于荒漠和戈壁的粉尘释放通量,表明沙丘及流沙覆盖的农田是粉尘释放的主要源地。

[参 考 文 献]

- [1] Zhang X L, Gong S L, Zhao T L, et al. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(24): 2272. doi:10.1029/2003GL018206
- [2] Liu X D, Hui S, Miao Y F, et al. Impacts of uplift of northern Tibetan Plateau and formation of Asian inland deserts on regional climate and environment[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 116(15): 1-14.
- [3] 王训明, 周娜, 郎丽丽, 等. 风沙活动对陆地生态系统影响研究进展[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(6): 627-635. Wang Xunming, Zhou Na, Lang Lili, et al. Aeolian processes and their effects on terrestrial ecosystem: An overview[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(6): 627-635. (in Chinese with English abstract)
- [4] Nield J M, Bryant R G, Wiggs G F S, et al. The dynamism of salt crust patterns on playas[J]. *Geology*, 2015, 43(1): 31-34.
- [5] Song H Q, Zhang K S, Piao S L, et al. Spatial and temporal variations of spring dust emissions in northern China over the last 30 years[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 126: 117-127.
- [6] 滕震礁. 不同地表下粉尘释放机制的风洞实验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. Teng Zhenjiao. *Experimental Investigation on the Dust Emission Mechanisms over Different Surface in Wind Tunnel*[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张正德, 潘凯佳, 梁爱民, 等. 戈壁沙尘释放过程与机理研究进展[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(9): 891-900. Zhang Zhengsi, Pan Kaijia, Liang Aimin, et al. Progress on process and mechanism of sand and dust emission on gobi[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(9): 891-900. (in Chinese with English abstract)
- [8] 车慧正, 张小曳, 李杨, 等. DPM模型计算中国北方沙漠地区粉尘释放通量[J]. *干旱区资源与环境*, 2005, 12(5): 49-55. Che Huizheng, Zhang Xiaoye, Li Yang, et al. Calculations of dust emission flux in Northern Deserts of China by DPM Model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 12(5): 49-55. (in Chinese with English abstract)
- [9] 梅凡民, Rajot J, Alfaro S, 等. 毛乌素沙地的粉尘释放通量观测及 DPM 模型的野外验证[J]. *科学通报*, 2006, 55(11): 1326-1332. Mei Fanmin, Rajot J, Alfaro S, et al. Calculations of dust emission flux in Mu Us Deserts of china by DPM Model[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 55(11): 1326-1332. (in Chinese with English abstract)
- [10] Xu B, Zhang J, Huang N, et al. Characteristics of turbulent aeolian sand movement over straw barriers and formation mechanism of their internal erosion form[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheric*, 2018, 123(13): 6907-6919.
- [11] 马艳萍, 黄宁. 植被与风蚀耦合动力学模型及其应用[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(3): 665-671. Ma Yanping, Huang Ning. Coupling dynamic model of vegetation and aeolian erosion and its application[J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(3): 665-671. (in Chinese with English abstract)
- [12] 孟小楠, 严平, 王振亭, 等. 车辆碾压作用下戈壁地表起尘浓度[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(3): 80-87. Meng Xiaonan, Yan Ping, Wang Zhenting, et al. Dust emission by vehicle crushing on Gobi of Gansu, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(3): 80-87. (in Chinese with English abstract)
- [13] Munkhtsetseg E, Shinoda M, Ishizuka M, et al. A livestock trampling function for potential emission rate of Wind-blown dust in a Mongolian temperate grassland[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(4): 11389-11401.
- [14] Zou X Y, Li J F, Cheng H, et al. Spatial variation of topsoil features in soil wind erosion areas of northern China[J]. *Catena*, 2018, 167: 429-439. doi.org/10.1016/j.catena.2018.05.022
- [15] Liu X X, Sun Y B, Vandenberghe J, et al. Paleoenvironmental implication of grain-size compositions of terrace deposits on the western Chinese Loess Plateau[J]. *Aeolian Research*, 2018, 32(2): 202-209.
- [16] 杜世松, 伍永秋, 黄文敏, 等. 风成沉积物源分析方法及

- 其应用研究进展[J]. 干旱区研究, 2015, 32(1): 184—191.
- Du Shisong, Wu Yongqiu, Huang Wenmin, et al. Research progress on analysis methods and their application of aeolian sediment sources[J]. *Arid Zone Research*, 2015, 32(1): 184—191. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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 Guangqiang, Dong Zhibao, Luo Wanyin, et al. Grain size characteristics and spatial variation of surface sediment in the Badain Jaran Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(6): 1357—1364. (in Chinese with English abstract)
- [18] Robert A Craddock, Stephen Tooth, James R Zimbleman, et al. Temporal observations of a linear sand dune in the Simpson Desert, central Australia: Testing models for dune formation on planetary surfaces[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2015, 120(10): 1736—1750.
- [19] 苏志珠, 梁爱民, 马义娟, 等. 库姆塔格沙漠典型线形沙丘粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 877—884.
- Su Zhizhu, Liang Aimin, Ma Yijuan, et al. Grain-size characteristics of typical linear dunes in the Kumtagh Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(4): 877—884. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王乐, 李改欣, 王仁德, 等. 半干旱区农田灌丛沙堆形态及沉积特征[J]. 水土保持研究, 2014, 21(4): 76—80.
- Wang Le, Li Gaixin, Wang Rende, et al. Morphology and sediment characteristics of nebkhas in semi-arid farmland[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(4): 76—80. (in Chinese with English abstract)
- [21] 董治宝, 陈广庭. 内蒙古后山地区土壤风蚀问题初论[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(2): 84—90.
- Dong Zhibao, Chen Guangting. A preliminary insight into the wind erosion problem in Houshan area of inner Mongolia[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1997, 3(2): 84—90. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王仁德, 常春平, 彭帅, 等. 基于粒度对比法的坝上农田风蚀与粉尘释放量估算[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 108—114.
- Wang Rende, Chang Chunping, Peng Shuai, et al. Estimation on farmland wind-erosion and dust emission amount in Bashang of Hebei province by grain composition contrast[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(21): 108—114. (in Chinese with English abstract)
- [23] Zhang Z C, Dong Z B, Qian G Q, et al. Implications of surface properties for dust emission from gravel deserts in the Hexi Corridor[J]. *Geoderma*, 2016, 268: 69—77.
- [24] Muhs Daniel R, Aleinikoff J N, TwJr S, et al. Late Quaternary loess in northeastern Colorado: Part 1. Age and paleoclimatic significance[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1999, 111(12): 1861—1875.
- [25] Mahowald N, Ward D S, Kloster S, et al. Aerosol impacts on climate and biogeochemistry[J]. *Annual Review of Environment & Resources*, 2011, 36(1): 45—74.
- [26] Shao Y, Wyrwoll K, Chappell A, et al. Dust cycle: An emerging core theme in earth system science[J]. *Aeolian Research*, 2011, 2(4): 181—204.
- [27] 康永德, 杨兴华, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地贴地层风沙流结构研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(2): 74—81.
- Kang Yongde, Yang Xinghua, He Qing, et al. Research on wind-sand flow structure of surface layer over the hinterland of the Taklimakan Desert[J]. *Desert and Oasis Metrology*, 2017, 11(2): 74—81 (in Chinese with English abstract)
- [28] 周雪英, 贾健, 刘国强, 等. 1997—2017年塔克拉玛干沙漠腹地降水特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(1): 187—194.
- Zhou Xueying, Jia Jian, Liu Guoqiang, et al. Characteristics of precipitation at hinterland of Taklimakan Desert, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(1): 187—194. (in Chinese with English abstract)
- [29] 周成龙, 钟昕洁, 张仕明, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地与周边地区降水及风沙环境对比分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2): 117—122.
- Zhou Chenglong, Zhong Xinjie, Zhang Shimin, et al. The comparison of precipitation and wind-blown sand environment over the hinterland of Taklimakan Desert with its surrounding regions[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(2): 117—122. (in Chinese with English abstract)
- [30] 元天刚, 陈思宇, 康丽泰, 等. 1961—2010年中国北方沙尘源区沙尘强度时空分布特征及变化趋势[J]. 干旱气象, 2016, 34(6): 927—935.
- Yuan Tiangang, Chen Siyu, Kang Litai, et al. Temporal and spatial distribution characteristics and change trends of dust intensity in dust source regions of northern China during 1961—2010[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2016, 34(6): 927—935. (in Chinese with English abstract)
- [31] 康永德, 杨兴华, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠不同下垫面梯度输沙样粒度特征分析[J]. 新疆师范大学学报: 自然科学版, 2016, 35(4): 1—6.
- Kang Yongde, Yang Xinghua, He Qing, et al. Characteristics of grain sizes for samples of different grades transporting sediment in the ground layer during the course of different underlying surface in the Taklimakan Desert[J]. *Journal of Xinjiang Normal University: Natural Science Edition*, 2016, 35(4): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [32] Hoffmann C, Funk R, Wieland R, et al. Effects of grazing and topography on dust flux and deposition in the Xilingele grassland, Inner Mongolia[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(5): 792—807.
- [33] Marticorena B. Modeling the atmospheric dust cycle. 1. design of a soil-derived dust emission scheme[J]. *Journal of Geophys Research*, 1995, 100(D8): 16415—16430.
- [34] Bagnold R A. 风沙荒漠沙丘物理学[M]. 北京: 科学出版社 1954.
- [35] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [36] Alfaro S C, Gomes L. Modeling mineral aerosol production by wind erosion: Emission intensities and aerosol size distributions in source areas[J]. *Journal of Geophysical*

- Research: Atmospheres, 2001, 106(D16): 18075—18084.
- [37] 黄润秋, 赵一飞, 刘晴, 等. 江苏如东近岸海域表层沉积物粒度特征及其环境意义[J]. 南京师大学报: 自然科学版, 2020, 43(1): 1—7.
Huang Runqiu, Zhao Yifei, Liu Qing, et al. Grain size characteristics and environmental significance of surface sediment in the coastal areas of Rudong in Jiangsu province, China[J]. Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition, 2020, 43(1): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [38] Callot Y P. Geomorphologic approach for modeling the surface of feature of arid environment in a model of dust emission: Application on the Saharan desert[J]. Geodinamica Acta, 2000, 13(5): 245—270.
- [39] 王涛. 中国沙漠与沙漠化[M]. 石家庄: 河北科技出版社, 2003.
- [40] Sweeney M R, McDonald E V, Etyemezian V. Quantifying dust emissions from desert landforms, eastern Mojave Desert, USA[J]. Geomorphology, 2011, 135(1/2): 21—34.
- [41] Zhang X Y, Arimoto R, Dust emission from Chinese desert sources linked to variation in atmosphere circulation[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D23): 28041—28047.

Characteristics of soil particle size distribution and its effect on dust emission in Taklimakan Desert

Yang Xinghua¹, Kang Yongde¹, Zhou Chenglong¹, Huo Wen¹, Yang Fan¹, Pan Honglin¹, Meng Lu¹, He Qing^{2*}

(1. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China;

2. Xinjiang Meteorological Bureau, Urumqi 830002, China)

Abstract: Transport of dust sand caused by wind erosion is a serious problem in many arid regions in the world, and it plays an important role in global biogeochemical cycle. The dust induced by transport of aeolian sand can affect atmospheric radiation balance, climate, environment, air quality and human health. It has hence attracted increased attention in various areas ranging from geomorphology and climatology to meteorology and ecological-environmental science. In addition to its natural origin, dust could also be instigated by anthropogenic activities due to desertification. However, the relative contribution of the two origins is still an issue remaining elusive. In addition, being able to accurately estimate the potential of a dust source is crucial to evaluating the influence of desertification and climate change on dust flux. The Taklimakan desert (TD) is the second largest shifting sand desert in the world, with about 85% made up by shifting sand dunes. It is an important source of the dusts seen in China. Understanding particle size distribution of the sand and dust emission is helpful to evaluate quality of the atmospheric environment and the consequence for climate at regional scale. We collected 138 samples from soil surface based on spatial distribution and types of the surfaces including farmland, dune and desert. Particle sizes of each sample were analyzed using the Mastersizer 2000 laser particle size analyzer, and the associated dust release flux was calculated using the DPM model. The particle size distribution of the microaggregates in each sample was obtained to elucidate its potential influence on dust release flux. The results showed that: 1) The content of silt and clay in the 138 samples was least, accounting for 10% to 18% of the total particles in the mobile sand dunes, and 20% to 30% of the total particles in the sand ridges (e.g., sandy soil and sandy-sandy loams). Most samples taken from farmland (e.g., oasis and forest belt) are meadow soil, with silt and clay content being 50%-80%, differing from the silt and clay content in samples taken from the Gobi (desert area). 2) Fine sand and silty-fine sand are the smaller particles in the surface soil and can be divided into three groups, each described by a lognormal distribution: silt-fine sand group, fine sand group and coarse sand group, with median particle size being 90, 225 and 500 μm , and the standard deviation being 1.02, 1.53 and 1.08, respectively, accounting for 30%, 49% and 21% respectively. 3) Emission of silt-fine sand and fine sand is most potential, followed by medium-coarse sand. The coarse sand is least to emit; the difference between the maximum and the minimum emission was in the order of $10^{-2} \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ in magnitude. The results reflect the difference in dust emission from different soil surfaces and they are greatly important for quantitative assessment of dust emission in the studied region and beyond.

Keywords: dust; grain; erosion; soils; emission