

DOI: 10.11766/trxb201706060235

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*

毛东雷^{1, 2, 3} 蔡富艳⁴ 方登先¹ 雷加强^{2, 3} 来风兵¹ 薛杰^{2, 3} 王雪梅¹

(1 新疆师范大学地理科学与旅游学院/新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 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 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 新疆策勒 848300)

(4 乌鲁木齐职业大学应用工程学院, 乌鲁木齐 830002)

摘要 新疆策勒绿洲—沙漠过渡带风沙活动频繁, 对其近地表风沙运动规律的研究具有重要意义。采用实验测定分析、线性回归分析、相关统计分析等研究方法, 对策勒绿洲—沙漠过渡带不同地貌部位表面及近地表输沙和降尘物质粒度及粒径分形特征进行了研究。结果表明: 策勒不同风沙运动形式沙尘物质组成主要为极粗粉砂和极细砂, 大气降尘物的粗粉砂含量偏高, 分形维数介于0.25~2.25; 五种沙尘物质平均分维值介于1.03~1.67, 灌丛沙堆表面沙物质粒径分形维数平均值最大, 其次依次为大气降尘、裸平沙地、地表输沙物质和流动沙丘的沙尘物质, 标准偏差值大小变化趋势与之相反。灌丛沙堆表面沙物质的粒径分形维数与沙物质平均粒径、分选系数等指标呈显著线性相关性, 流动沙丘表面沙物质平均粒径的分形维数与粒度参数之间线性相关性不显著。灌丛沙堆、流动沙丘、地表输沙物质的黏粒含量与分形维数均呈极显著正相关性 ($p < 0.01$), 灌丛沙堆与地表输沙物质的砂粒级含量与分形维数呈显著负相关, 大气降尘物的粉砂含量与分形维数呈显著负相关 ($p < 0.05$)。流动沙丘表面沙物质的粉砂和砂百分含量与分维值无显著相关性。沙物质的粒度组成、运动形式、植被覆盖度、风力及地形等均是导致绿洲—沙漠过渡带沙尘粒度及分形特征差异的主要原因。

关键词 绿洲—沙漠过渡带; 灌丛沙堆; 流动沙丘; 大气降尘; 粒径分形; 策勒

中图分类号 S152.3 **文献标识码** A

1977年法国学者Mandelbrot^[1]首次提出了分形理论, 至今已广泛应用于诸多研究领域。土壤在结构性状上表现的自相似性, 被认为是一种具有分形特征的分散多孔介质^[2-4], 土壤粒径的分形维数能反映土壤粒径大小及质地均匀程度等特性^[5]。在沙漠化研究领域, 赵永平和王一谋^[6]研究了分形理论在沙漠化定量研究中的前景。徐建华等^[7-8]以黑河流域为例分析了西北干旱区风沙地貌的分形

几何实体以及沙丘分形特征, 其分维值体现了风沙地貌的自相似规律。屈建军等^[9]分析了巴丹吉林沙漠高大沙山典型区风沙地貌的分形特性。苏永中和赵哈林^[10]分析了科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征。研究^[11-14]表明, 黏粒含量越高, 质地越细, 分形维数越高, 分形特征因风蚀强度和植被覆盖度不同而发生规律性改变。由于不同区域环境沙源沉积物不同, 各地沙物质粒度组成及

* 新疆维吾尔自治区高校科研计划项目 (XJEDU2016I035)、新疆师范大学博士科研启动基金项目 (XJNUBS1527) 和国家自然科学基金项目 (41601595, 41661002, 41561051) 资助 Supported by the Scientific Research Projects for Higher Educational Universities in Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. XJEDU2016I035) and Start-up Fund of Doctoral Research of Xinjiang Normal University (No. XJNUBS1527) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41601595, 41661002 and 41561051)

作者简介: 毛东雷 (1975—), 男, 新疆石河子人, 博士, 副教授, 主要从事风沙地貌及荒漠化防治研究。E-mail: donglei6325@sina.com。

收稿日期: 2017-06-06; 收到修改稿日期: 2017-08-31; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2017-09-21

特征也存在很大差别。

新疆策勒—绿洲沙漠过渡带一直是研究的热点地区，有关其地表沙物质粒径及其分布方面也展开了一定的研究^[15-19]，沿主风向从流沙地至固定沙地，地表沙物质平均粒径有逐渐细化的趋势，但关于粒径分形特征的报道甚少。因此，本文着重研究该地区风沙运动沙尘物质粒度和分形特征差异，旨在为进一步防治该地区荒漠化和完善绿洲—沙漠过渡带风沙活动规律等提供理论依据和科学支撑。

1 材料与方 法

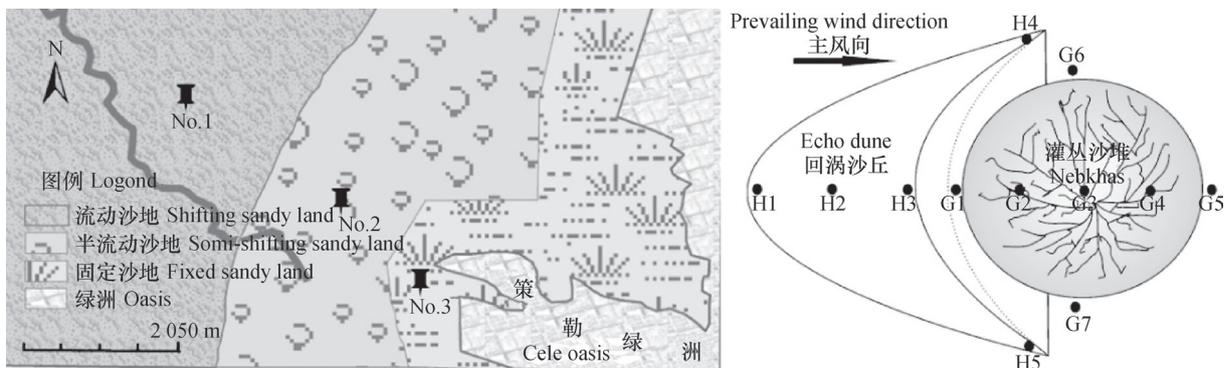
1.1 研究区概况

策勒县位于80°03'24"E~82°10'34"E和35°17'55"N~39°30'00"N，南部为昆仑山区，北部为沙丘接塔克拉玛干流动沙漠，地势上南高北低。本区气候干旱，降水少，年均降水量仅35.1 mm，干燥度为20.8，属典型的极端干旱型温带大陆性气候。日照时间长，昼夜温差大，最高温度达41.9℃，最低气温至-23.9℃，每年平均沙尘天气25.2 d，最多年高达59 d，8级以上大风40 d^[20]。风沙灾害频发，以西风为主^[21]。自然植被主要为疏叶骆驼刺 (*Alhagi sparsifolia*)、花花柴 (*Karelinia caspica*) 和多枝怪柳 (*Tamarix ramosissima*)，土壤以棕漠土 (正常干旱土) 和风沙土 (砂质新成土) 为主，物质组成主要为极细

砂和粉砂，质地轻，粒径细，易形成风沙流。

1.2 野外调查采样设计

沿主风向，在策勒绿洲—沙漠过渡带流沙前缘至绿洲边缘依次布置3个观测点，分别代表流沙地 (No.1)、半固定沙地 (No.2) 和固定沙地 (No.3)，植被覆盖度分别为3%、27%和67%。流沙地植被主要有稀疏怪柳及盐生草，半固定沙地植被主要有怪柳、花花柴、骆驼刺混生群落，固定沙地植被主要为骆驼刺群落。沿策勒沙漠—绿洲过渡带天然植被盖度发生明显变化的地方 (约每隔200 m) 依次选取15个怪柳灌丛沙堆顶部 (G3) 和9个骆驼刺、花花柴灌丛沙堆顶部 (G3) 及迎风坡坡底 (G1)、坡中 (G2)、背风坡坡中 (G4)、坡底 (G5) 采集表面1 cm深度沙样，共采集沙样60个。在3个观测点分别安装1个BSNE (Big spring number eight) 集沙仪和1个20 cm高度的单方位梯度集沙仪，每个BSNE集沙仪安装离地表10、20、30、50、100和200 cm高度的集沙盒，单方位阶梯式集沙仪每1 cm高度采集一个近地表输沙沙样，输沙口宽分别为2 cm和1 cm，共获取输沙物质97个 (图1左)。自流沙前缘沿主风向至半固定沙地 (约每隔200 m) 依次选取14个流动和半流动沙丘 (主要为新月形沙丘和沙垄) 采取沙丘顶部 (H3) 表面沙样，同时，另外随机选取3个灌丛沙堆上风向回涡沙丘，采集表面迎风坡底部 (H1)、中部 (H2)、顶部 (H3)、侧翼 (H4、



注：No.1、No.2和No.3分别代表流沙地、半固定沙地和固定沙地观测点。H1、H2、H3、H4、H5依次表示回涡沙丘迎风坡底、迎风坡中、顶部及2个侧翼，G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7依次表示灌丛沙堆迎风坡底、迎风坡中、顶部、背风坡中、背风坡底、2个侧翼 Note: No.1, No.2 and No.3 represents observation site of shifting sandy land, semi-fixed sandy land and fixed sandy land, respectively. H1, H2, H3, H4 and H5 stands for foot of windward slope, middle part of windward slope, top and 2 side slopes of an echo dune, respectively, and G1, G2, G3, G4, G5, G6 and G7 for foot of ofdownward slope, middle part of ofdownward slope, top, middle part of leeward slope, foot of leeward slope and 2 side slopes of nebkhas, respectively

图1 策勒绿洲—沙漠过渡带区位图及灌丛沙堆及回涡沙丘取样点

Fig. 1 Geographic location map of the Cele oasis-desert ecotone and distribution of sampling sites of nebkhas and echo dunes

H5) 沙样 (图1右), 共采集29个沙样, 沿沙漠—绿洲过渡带植被盖度明显发生变化的裸平沙地采集表面1 cm沙样31个。在No.1、No.2和No.3观测点及绿洲内部分别安装0.5 m、1 m和3 m三层高度的降尘桶, 用于降法同步采集风沙天气过后的大气降尘物, 共采集大气降尘样21个。除输沙沙样和大气降尘样外, 其余采样样品重量均为200 g, 所有沙样进行筛选、去除杂质后用精度0.001 g的天平称重, 然后用激光粒度仪 (Mastersize2000, 马尔文仪器公司, 英国) 进行测试分析, 计算各沙尘样粒级组成的体积百分含量。

1.3 沙粒的粒径分级与统计分析参数

采集沙尘样用0.001 g标准天平称重, 在实验室进行粒度分析, 根据福克-沃德公式和定义^[22]用GRADISTAT粒度分析软件得到各粒度参数, 粒度分级采用Udden-Wentworth分类^[23-24]: 黏土, 0~2 μm; 粉砂, 2~63 μm (细分为极细粉砂, 2~4 μm; 细粉砂, 4~8 μm; 中粉砂, 8~16 μm; 粗粉砂, 16~31 μm; 极粗粉砂, 31~63 μm); 砂, 63~1 000 μm (细分为极细砂, 63~125 μm; 细砂, 125~250 μm; 中砂, 250~500 μm; 粗砂, 500~1 000 μm)。

分形维数应用杨金玲等^[25]、王国梁等^[26]、Tyler和Wheatcraft^[27]提出的关系式:

$$\lg \left[\frac{V(r < R_x)}{V_T} \right] = (3-D) \lg \left(\frac{R_x}{R_{max}} \right) \quad (1)$$

式中, R 为两筛分粒级 R_x 与 R_{x+1} 间粒径的平均值, R_{max} 为最大粒级土粒的粒径, $V(r < R_x)$ 为粒径小于 R_x 的颗粒累积体积, V_T 为土壤各粒级体积的总和。由式(1)分别以 $\lg V(r < R/V_T)$ 和 $\lg(R/R_{max})$ 为纵坐标和横坐标, 得出线性拟合方程的斜率值为 $3-D$, D 为沙物质的分形维数。

1.4 数据处理与制图

所有数据用Microsoft Excel 2013、IBM Statistics SPSS 17.0、Origin 9.0软件分析并绘制相关图表。

2 结果

2.1 不同运动形式沙尘物质粒级组成

在灌丛沙堆、流动沙丘、裸平沙地表面和地表输沙物质、大气降尘沙尘物质中, 极细砂和极粗粉砂粒级所占的比例最大 (图2), 分别介于8.08%~58.47%和17.85%~34.29%之间, 其次是细砂, 介于0.006%~21.62%之间; 其他粒级所占的百分比均较少, 合计介于2.06%~5.09%, 但大气降尘物中其余粒级含量明显偏高, 合计为

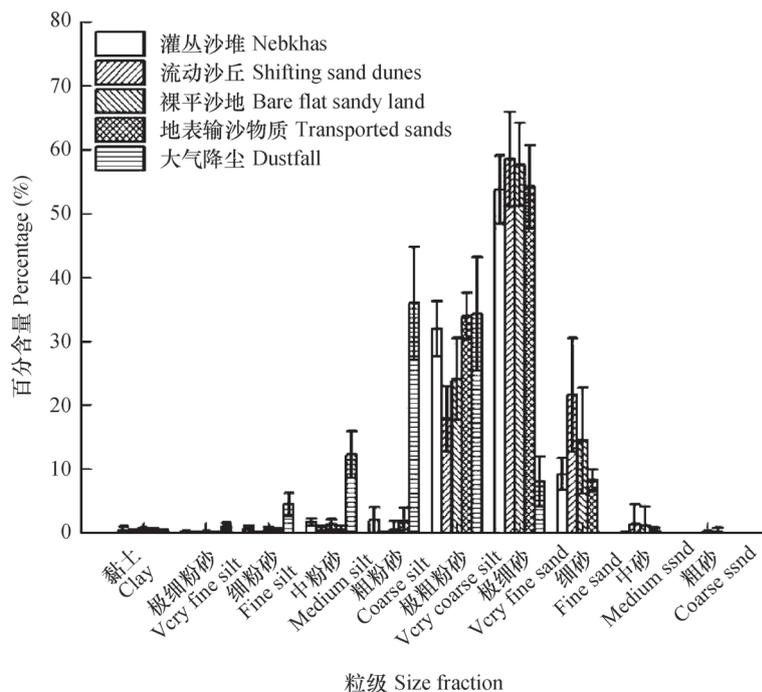


图2 风沙运动沙尘物质粒级百分含量

Fig. 2 Particle size fractions and their percentages of the materials in aeolian sand and dust movement

53.93%。灌丛沙堆表面沙物质黏土含量最高，占到0.36%，其余四种沙尘物质黏土含量较低，不足0.26%。灌丛沙堆表面粉砂含量约占36.66%，其中极粗粉砂偏多，砂含量最大为62.96%，主要为极细砂。流动沙丘沙粒黏土含量最低，粉砂含量较灌丛沙堆少，仅为18.35%，大多为砂且极细砂和细砂比例分别为58.46%和21.61%。裸平沙地地表粉砂含量高于流动沙丘表面，约占26.46%，砂含量占73.31%，最多的为极细砂。地表输沙物质粉砂和砂含量分别为36.62%和62.72%，极粗粉砂和极细粉砂偏多。大气降尘细粉砂比例相对其他四类沙物质明显偏高，其粗粉砂和极粗粉砂分别占35.89%和34.29%，细砂含量所占比例最小，为0.006%。

2.2 五种沙尘物质分形维数特征及标准偏差

策勒绿洲—沙漠过渡带风沙运动的沙尘物质的粒径分形维数介于0.25~2.25，五种类型沙尘物质平均分形值介于1.03~1.67，标准偏差介于0.25~0.73（图3），分形维数平均值由大到小依次为灌丛沙堆（1.67）>大气降尘（1.64）>裸平沙地（1.39）>地表输沙物质（1.35）>流动沙丘（1.03），而标准偏差值大小与之相反，依次为灌丛沙堆（0.256）<大气降尘（0.358）<裸平沙地（0.364）<地表输沙物质（0.505）<流动沙丘（0.73）。

土壤分形维数反映土壤的自我相似性，与沙粒

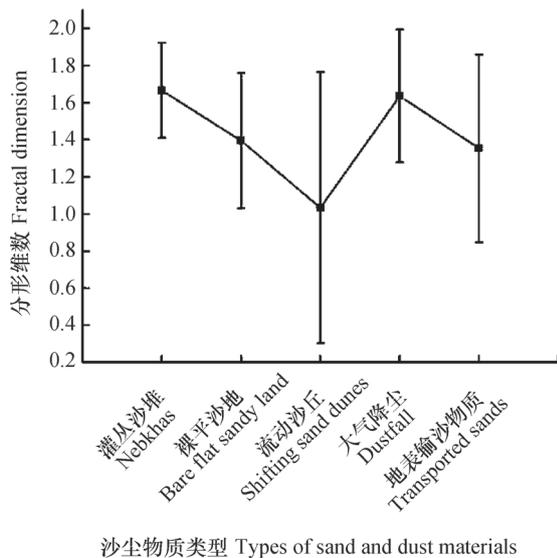


图3 风沙运动五种沙尘物质分形维数

Fig. 3 Fractal dimensions of the five types of sand and dust materials in aeolian sand and dust movements

的粒级含量相关。标准偏差反映沙粒粗细的离散程度，值越大离散程度越大。标准偏差值最大的为流动沙丘表面沙物质，最小为灌丛沙堆表面沙物质。有研究表明^[11]，植被覆盖度不同会导致土壤的粒度特征变化。植被覆盖度越小，土壤组成中细颗粒越少，质地均一程度越差。用分形维数 D 值的大小代表该景观要素镶嵌结构的复杂性与稳定性^[28]。 D 值越大，则表示该要素的镶嵌结构越复杂。在复杂性排序中，流动沙丘表面镶嵌结构最为简单，即植被稀少，离散程度高，且流动沙丘表面因风力大，其颗粒整体偏粗，故其分形维数最小。由于风沙流遇到灌丛阻挡作用，使灌丛沙堆沙物质在灌丛及其周围堆积，其黏土含量相对偏多，占比最大的为极细粉砂、极细砂，其变异性小，相似性越大，故其分形维数最大。风沙地貌形成的物质基础沙粒的粒径分布具有分形特征，其分形值的大小差异体现了沙物质分布的区域差异性。从沙漠至绿洲方向，地表极细砂和细砂的含量越多^[17]，说明随着地表植被盖度的增加，风力逐渐消减，由风力搬运、沉积的极粗粉砂和极细砂占比就会增加，分形维数也逐渐增大。

2.3 不同风沙运动形式沙粒分形维数与粒度特征的相关性

灌丛沙堆表面沙物质的分形维数与峰态值之间的线性拟合程度最好，与平均粒径的拟合度较弱（图4）。拟合方程的决定系数介于0.683~0.348，说明灌丛沙堆表面沙粒分形维数与粒度特征之间存在相关性。从流动沙丘沙粒至灌丛沙堆表面沙粒，由于风力搬运、沉积，输沙量随之减少，灌丛沙堆表面的沙粒主要为粉砂和砂，其中，极粗粉砂和极细砂含量偏高。随着植被覆盖度的增大，植被对风的阻碍作用加强，沙粒的分选性变好，灌丛沙堆表面沙粒自我相似性最高，与沙粒的4个特征指标之间相关性最显著。灌丛沙堆表面沙物质分形维数与平均粒径的拟合程度一般，与分选系数拟合程度中等， $R^2=0.595$ ，说明其分形维数越大，分选性越好，与偏度拟合程度中等偏上， $R^2=0.655$ ，与峰态值之间线性拟合程度中等偏上， $R^2=0.683$ 。由于灌丛沙堆表面沙物质从迎风坡底部至顶部由粗变细，又从顶部至背风坡底部由细变粗，不同地貌部位沙粒粒级组成有一定差异，因此，分形维数与偏度、峰态值线性拟合程度不显著。

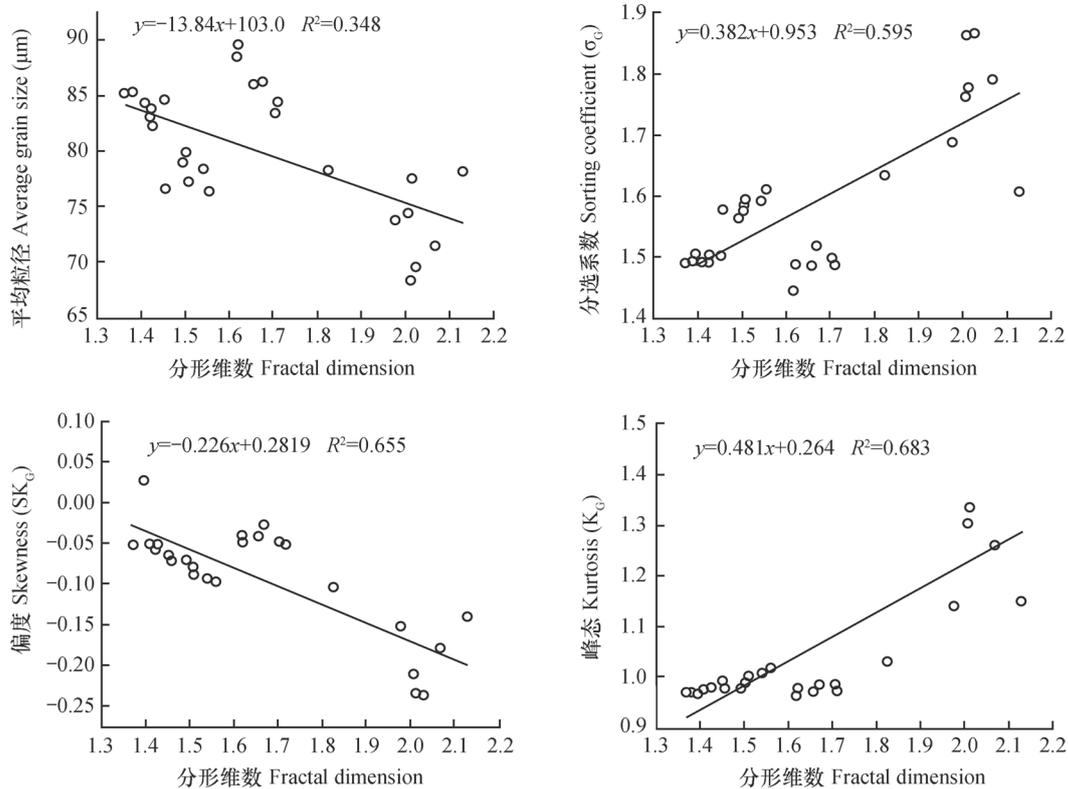


图4 灌丛沙堆表面沙物质分形维数与粒度参数之间拟合直线

Fig. 4 Fitting line between fractal dimension and grain size parameters on the surfaces of nebkhas

流动沙丘表面沙物质分形维数与各粒度特征指标之间线性拟合程度均偏低（图5），相比分形维数与分选系数和偏度值之间的拟合程度更差。分选系数越大，分选性越差，表现出较低的相关性。由于流沙地和半固定沙地风力大、流沙表面的沙物质表现为相对偏粗，分选性为中等至中等偏上。流动沙丘表面沙物质平均粒径以极细砂和细砂为主，从不同部位来看，平均粒径表现为底部粗于顶部，分选性多数为顶部分选性好于底部，偏度来看均呈近对称分布，峰态呈中等峰态。

裸平沙地表面沙粒的分形维数与粒度特征间表现为分形维数与峰态值之间线性拟合程度中等， R^2 为0.571，与平均粒径、分选系数、偏度的线性拟合程度较差（图6）。裸平沙地地表沙粒平均粒径较输沙沙粒平均粒径粗，经风力搬运后仅有极细砂容易被风蚀，而中砂不容易遭受风蚀，因此分选性好于近地表输沙物质。峰态属中等至窄峰态，输沙沙粒多表现为偏粗，粉砂含量中最多极粗粉砂占24.09%，极细砂含量占57.65%，输沙沙粒分选性中等，稍差于裸平沙地沙样的分选性。

地表输沙物质分形维数与各粒度参数之间呈一

定线性相关性，但拟合程度均较差（图7）。大气降尘物质悬移在上层气流中，偏度表现为细偏，大气降尘物分维值与偏度值之间呈较好的线性负相关性（图8）。图4至图8中，不同运动形式沙尘物质表现为跃移、蠕移和悬移，其沙粒特征参数存在明显差异。灌丛沙堆沙物质表面有植被覆盖，沙物质的粒度特征与分形维数之间线性拟合程度较好，大气降尘物质、裸平沙地、地表输沙物质、流动沙丘土壤分形维数与粒度特征参数拟合度依次减弱，部分表现为低弱的线性相关性。

沙尘物质分形维数与粒级含量的相关性分析中，灌丛沙堆、流动沙丘、地表输沙物质的黏粒百分含量与分形维数均呈极显著正相关性（ $p < 0.01$ ）（表1），灌丛沙堆表面砂粒含量与分形维数呈显著负相关性（ $p < 0.05$ ），裸平沙地表面沙物质的粉砂含量与分形维数呈显著正相关性（ $p < 0.05$ ），地表输沙物质的粉砂、砂含量与分形维数分别呈极显著正相关和负相关性（ $p < 0.01$ ）。大气降尘物的粉砂含量与分形维数呈显著负相关性（ $p < 0.05$ ）。灌丛沙堆、裸平沙地、地表输沙物质的黏粒、粉砂和砂含量之间均呈现显著的相关性。

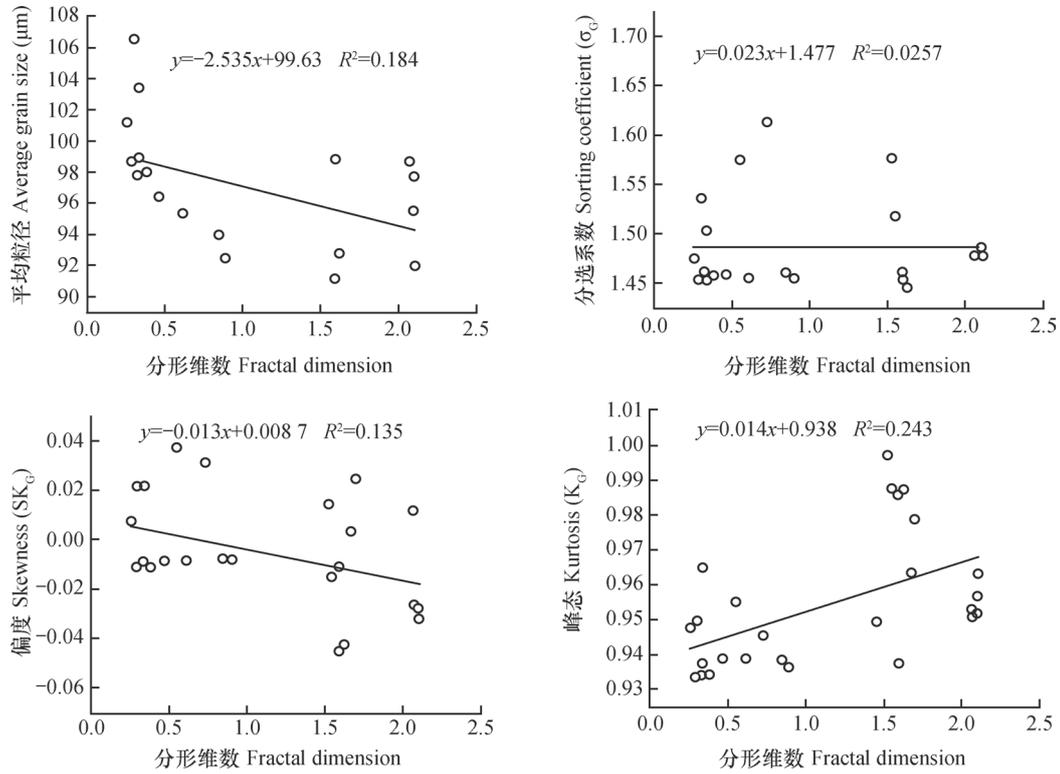


图5 流动沙丘表面沙物质分形维数与粒度参数之间拟合直线

Fig. 5 Fitting line between fractal dimension and grain size parameters on the surfaces of shifting sand dunes

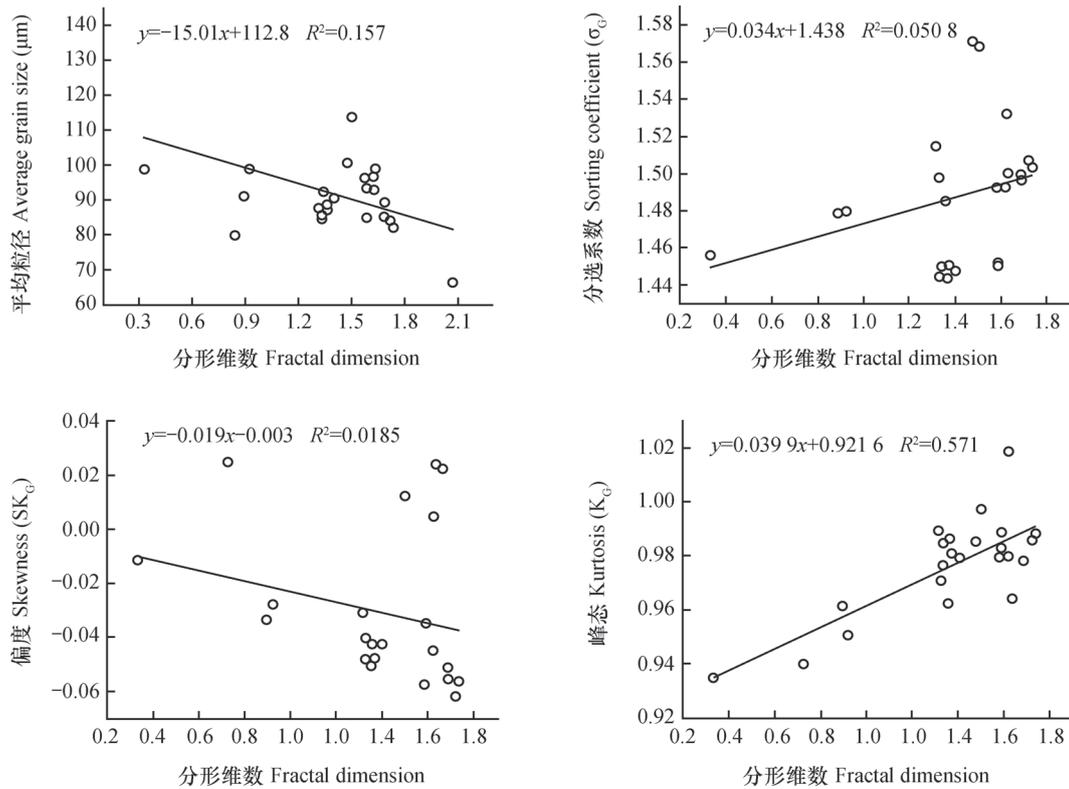


图6 裸平沙地表面沙物质分形维数与粒度参数之间拟合直线

Fig. 6 Fitting line between fractal dimension and grain size parameters on the surfaces of bare sandy land

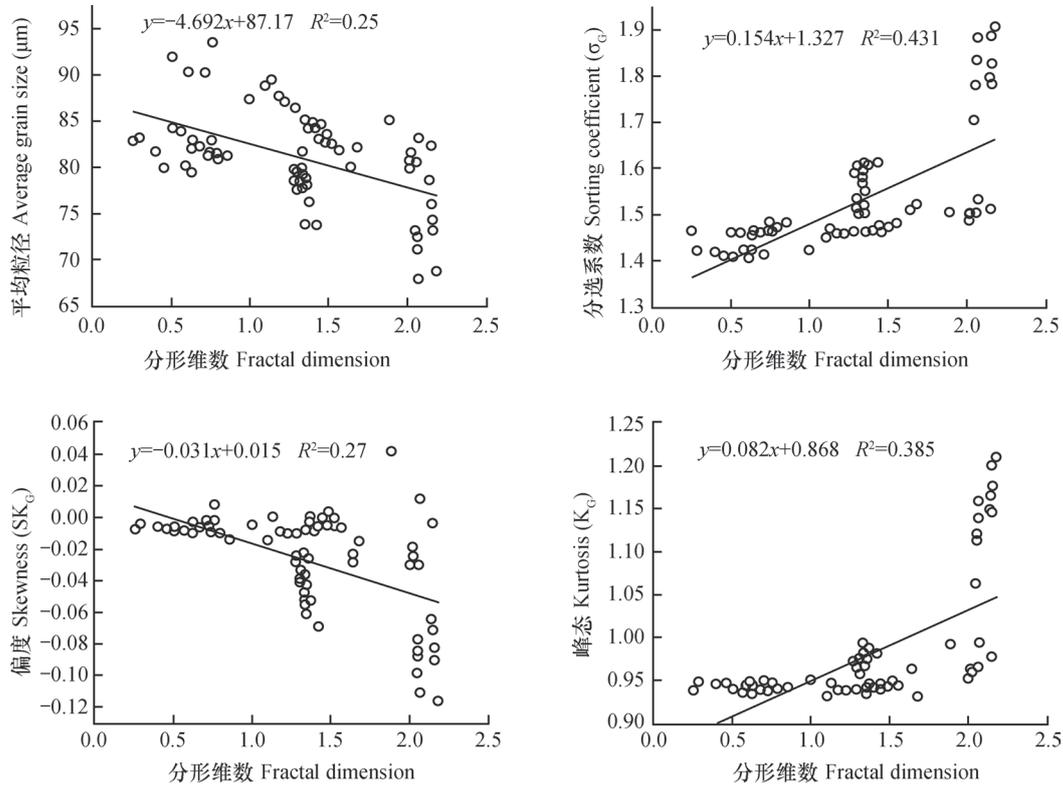


图7 地表输沙物质分形维数与粒度参数之间拟合直线

Fig. 7 Fitting line between fractal dimension and grain size parameters of transported sands near ground surface

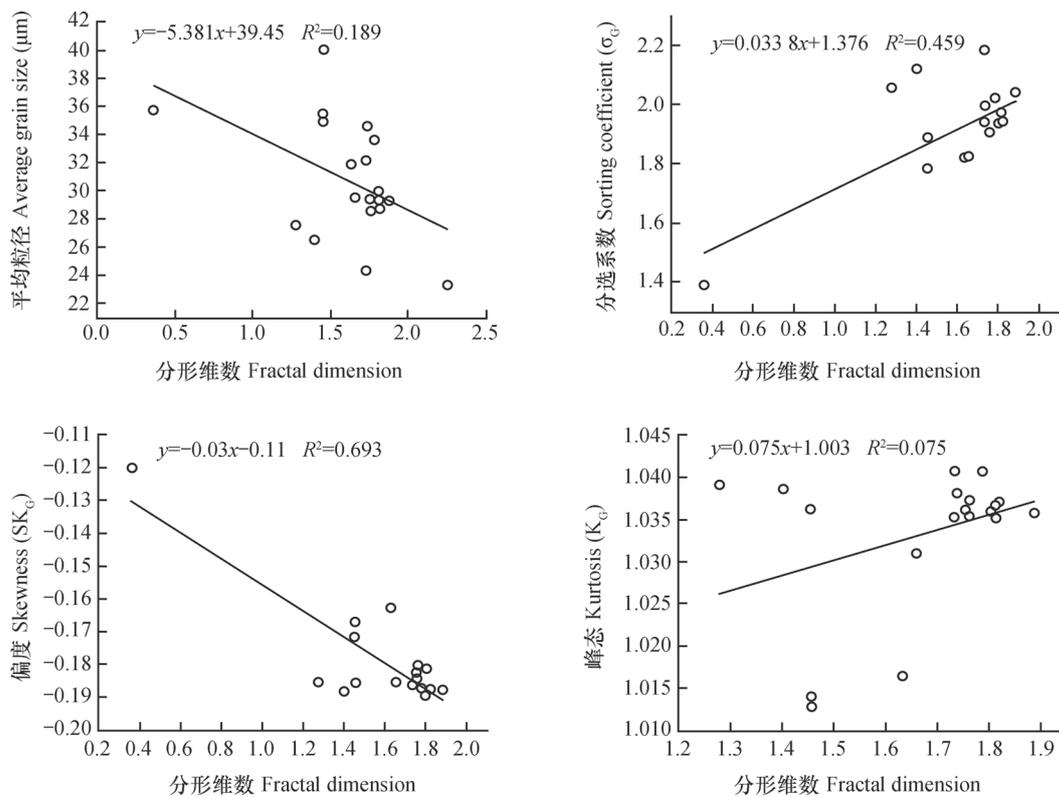


图8 大气降尘物分形维数特征与粒度参数之间拟合直线

Fig. 8 Fitting line between fractal dimension and parameters of particle size of the materials in dustfall

表1 风沙运动沙尘物质分形维数与粒径组成的相关性

Table 1 Correlation analysis of fractal dimension with grain size composition of aeolian sand and dust materials

沙尘物质类型 Types of sand and dust materials	指标 Index	分形维数 Fractal dimension	黏土 Clay	粉砂 Silt	砂 Sand
灌丛沙堆 Nebkhas	分形维数Fractal dimension	1			
	黏土 Clay	0.903**	1		
	粉砂 Silt	0.351	0.379*	1	
	砂 Sand	-0.417*	-0.453*	-0.997**	1
流动沙丘 Shifting sand dunes	分形维数Fractal dimension	1			
	黏土 Clay	0.590**	1		
	粉砂 Silt	-0.028	0.262	1	
	砂 Sand	-0.026	-0.346	-0.996**	1
裸平沙地 Bare flat sandy land	分形维数Fractal dimension	1			
	黏土 Clay	-0.206	1		
	粉砂 Silt	0.386*	0.383*	1	
	砂 Sand	-0.360	-0.441*	-0.998**	1
地表输沙物质 Transported sands	分形维数Fractal dimension	1			
	黏土 Clay	0.713**	1		
	粉砂 Silt	0.434**	0.455**	1	
	砂 Sand	-0.552**	-0.499**	-0.764**	1
大气降尘 Dustfall	分形维数Fractal dimension	1			
	黏土 Clay	0.086	1		
	粉砂 Silt	-0.444*	0.103	1	
	砂 Sand	0.267	-0.189	-0.227	1

注：*表示在0.05水平（双侧）上显著相关，**表示在0.01水平（双侧）上显著相关 Note: *correlation is significant at the 0.05 level (two tailed). **correlation is significant at the 0.01 level (two tailed)

3 讨论

已有研究^[17]表明，策勒沙漠—绿洲过渡带的地表沙物质机械组成以极细砂和细砂为主。本文研究得出了相似结果，灌丛沙堆、裸平沙地、流动沙丘表面沙物质及地表输沙物质以极粗粉砂和极细砂为主，而大气降尘沙物质以粗粉砂和极粗粉砂为主。

已有研究^[8]表明，风沙地貌是一个典型的分形几何体，分维值的大小能体现风沙地貌的自相似规律。沙粒大小分形维数和黏粉粒含量呈显著正相关关系，与极细砂含量相关性较强，与砂粒含量呈显著的负相关关系^[29-31]。本文研究表明，灌丛沙堆、流动沙丘、地表输沙物质的黏粒百分含量与分

形维数呈显著正相关性，而灌丛沙堆与流动沙丘表面沙物质的粉砂含量与分形维数之间无显著相关性，大气降尘物质的黏粒和砂含量与分形维数之间无显著相关性。策勒绿洲农田开垦利用年限的差异性对土壤粒径分布产生重要影响，而空间位置不同对农田土壤粒径空间分布影响较小^[32-33]，说明经过植被拦截和风力分选过程的绿洲—沙漠过渡带天然沙尘物质粒径空间分布特征不同于绿洲农田土壤，其粒径组成等与分形维数之间关系密切，人为活动可以改善风沙土壤粒径分布属性的稳定性。策勒干旱区较强的风力作用使得土壤风蚀和堆积过程较为复杂，从流沙前缘至绿洲边缘地表沙物质逐渐细化^[17]。灌丛沙堆表面沙物质黏粒含量为5种风沙运动沙尘物质中最多的，因此其粒径分维值也最

大。一般而言,气流所含的沙粒距离地表愈高越细,越靠近地表越粗^[34]。大气降尘物的分维值相对大于裸平沙地、流动沙丘和地表输沙物质,是由于其运动远离地表,外加风力作用的搬运,因此,较细的粗粉砂和极粗粉砂含量远大于其余4种风沙运动形式沙物质。对比大气降尘、裸平沙地、灌丛沙堆等5种不同运动形式的沙尘物质分形特征参数,发现沙物质的粒径含量、流动、半固定和固定沙地的地表形态、地表风速以及下垫面粗糙度和植被覆盖度的高低等,均是不同风沙运动沙尘物质分形维数产生差异的原因。绿洲—沙漠过渡带天然植被能防风固沙、改善风沙土壤粒径属性的稳定性,因此,采取合理的天然或人工措施有效恢复绿洲—沙漠过渡带植被覆盖度,对维护绿洲农业生态安全至关重要。

策勒绿洲—沙漠过渡带风沙运动沙尘物质分形维数空间分布特征可以指示不同沙漠化程度及风沙活动强度空间差异,可以为塔里木盆地南缘绿洲—沙漠过渡带风沙危害的防治提供理论依据。

4 结 论

新疆策勒绿洲—沙漠过渡带沙粒粒径含量表现为极细砂和极粗粉砂所占比例最大,从流沙前缘至绿洲边缘土壤颗粒逐渐细化,空气流中距离地表较高的大气降尘物细粉砂含量相对偏高,粉砂含量占88.02%。风沙运动5种沙尘物质粒径的分形维数值介于0.25~2.25,平均值大小关系表现为灌丛沙堆>大气降尘>裸平沙地>地表输沙物质>流动沙丘,标准偏差值大小则相反。灌丛沙堆表面沙物质的分形维数与分选系数、峰态表现为线性正相关,与偏度为负相关;流动沙丘表面沙物质分形维数与粒度指标之间相关性不显著。灌丛沙堆表面沙物质中黏土含量最高,灌丛沙堆、流动沙丘、地表输沙物质的黏粒含量与分形维数均呈极显著正相关性,大气降尘物的粉砂含量与分形维数呈显著负相关。流动沙丘表面沙物质主要为粉砂和砂,与分维值无显著相关性。

参 考 文 献

[1] Mandelbrot B B. Fractals: Form, chance and dimension. San Francisco: Freeman and Company, 1977: 1—365

- [2] 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其展望. 土壤学进展, 1994, 22 (1) : 1—10
Li B G. Application of fractal theory and the prospect in soil science (In Chinese) . Advances in Soil Science, 1994, 22 (1) : 1—10
- [3] Burrough P A. Multiscale sources of spatial variation in soil. I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation. Journal of Soil Science, 1983, 34 (3) : 577—597
- [4] Armstrong A C. On the fractal dimensions of some transient soil properties. Journal of Soil Science, 1986, 37 (4) : 641—652
- [5] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38 (20) : 1896—1899
Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Represent soil fractal features by using particle mass distribution (In Chinese) . Chinese Science Bulletin, 1993, 38 (20) : 1896—1899
- [6] 赵永平, 王一谋. 图形分形理论在沙漠化定量研究中的应用. 中国沙漠, 1995, 15 (2) : 175—180
Zhao Y P, Wang Y M. Graphic fractionation and its application based on quantitative research of desertification (In Chinese) . Journal of Desert Research, 1995, 15 (2) : 175—180
- [7] 徐建华, 艾南山, 金炯, 等. 西北干旱区景观要素镶嵌结构的分形研究. 干旱区研究, 2001, 18 (1) : 35—39
Xu J H, Ai N S, Jin J, et al. A fractal study on the mosaic structure of the landscape of northwest China—Taking the drainage area of Heihe River as an example (In Chinese) . Arid Zone Research, 2001, 18 (1) : 35—39
- [8] 徐建华, 艾南山, 金炯, 等. 沙漠化的分形特征研究. 中国沙漠, 2002, 22 (1) : 6—10
Xu J H, Ai N S, Jin J, et al. Study on fractal characters of desert and desertification (In Chinese) . Journal of Desert Research, 2002, 22 (1) : 6—10
- [9] 屈建军, 常学礼, 董光荣, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山典型区风沙地貌的分形特性. 中国沙漠, 2003, 23 (4) : 361—365
Qu J J, Chang X L, Dong G R, et al. Fractal behavior of aeolian sand landform in typical megadune area of Badain Jaran Desert (In Chinese) . Journal of Desert Research, 2003, 23 (4) : 361—365
- [10] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征. 生态学报, 2004, 24 (1) : 71—74
Su Y Z, Zhao H L. Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farmland in Horqin Sandy Land (In Chinese) . Acta Ecological

- Sinica, 2004, 24 (1): 71—74
- [11] 胡云峰, 刘纪远, 庄大方, 等. 不同土地利用/土地覆盖下土壤粒径分布的分形特征. 土壤学报, 2005, 42 (2): 336—339
- Hu Y F, Liu J Y, Zhuang D F, et al. Fractal dimension of soil particle size distribution under different land use / land coverage (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42 (2): 336—339
- [12] 杨秀春, 刘连友, 严平. 土壤短期吹蚀的粒度分形特征. 土壤学报, 2004, 41 (2): 176—182
- Yang X C, Liu L Y, Yan P. Fractal dimension of soil particle size by wind erosion in a short period (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41 (2): 176—182
- [13] 李德成, 张桃林. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究. 土壤与环境. 2000, 9 (4): 263—265
- Li D C, Zhang T L. Fractal features of particle size distribution of soils in China (In Chinese). Soil and Environmental Sciences, 2000, 9 (4): 263—265
- [14] 张世熔, 邓良基, 周倩, 等. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系. 土壤学报, 2002, 39 (2): 221—226
- Zhang S R, Deng L J, Zhou Q, et al. Fractal dimensions of particle surface in the plowed and their relationships with main soil properties (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39 (2): 221—226
- [15] 毛东雷, 雷加强, 李生字, 等. 策勒沙漠—绿洲过渡带不同下垫面的输沙通量及粒度差异特征. 干旱区资源与环境, 2014, 28 (2): 167—174
- Mao D L, Lei J Q, Li S Y, et al. Differences of sand transportation flux and sand grain size characteristics indifferent underlying surfaces on desert—oasis ecotone in Cele (In Chinese). Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28 (2): 167—174
- [16] 王翠, 雷加强, 李生字, 等. 策勒绿洲—沙漠过渡带风沙流挟沙粒度的垂直分异. 干旱区地理, 2014, 37 (2): 230—238
- Wang C, Lei J Q, Li S Y, et al. Vertical distribution of grain size in aeolian flow in Cele—oasis—desert ecotone (In Chinese). Arid Land Geography, 2014, 37 (2): 230—238
- [17] 毛东雷, 雷加强, 李生字, 等. 新疆策勒绿洲—沙漠过渡带地表沙物质理化性质空间差异. 中国沙漠, 2015, 35 (1): 136—144
- Mao D L, Lei J Q, Li S Y, et al. Spatial differentiation of physical—chemical properties of surface sand materials in the oasis—desert ecotone in Cele, Xinjiang, China (In Chinese). Journal of Desert Research, 2015, 35 (1): 136—144
- [18] 毛东雷, 雷加强, 王翠, 等. 新疆策勒县沙漠—绿洲过渡带风沙流结构及输沙粒度特征. 水土保持通报, 2015, 35 (1): 25—33
- Mao D L, Lei J Q, Wang C, et al. Characteristics of sand flow structure and sand transportation particles in Cele desert—oasis ecotone of Xinjiang Wei Autonomous Region (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35 (1): 25—33
- [19] 林永崇, 徐立帅. 策勒绿洲—沙漠过渡带风成沉积物粒度的空间变化. 应用生态学报, 2017, 28 (4): 1337—1343
- Lin Y C, Xu L S. Spatial change of the grain—size of aeolian sediments in Qira oasis—desert ecotone, Northwest China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28 (4): 1337—1343
- [20] 张鹤年. 塔克拉玛干沙漠南缘—绿洲过渡带生态环境区综合治理技术与试验示范研究. 干旱区研究, 1995, 12 (4): 1—9
- Zhang H N. Research on comprehensive control technology and experimental demonstration of ecological environment district of desert—oasis ecotone on southern Taklimakan Desert (In Chinese). Arid Zone Research (In Chinese), 1995, 12 (4): 1—9
- [21] 杨佐涛. 戈壁与绿洲内的风向风速关系——以新疆策勒县为例. 中国沙漠, 1990, 10 (3): 36—42
- Yang Z T. Relationship between wind direction and wind velocity in Gobi Desert and oasis: Taking for Cele County in Xinjiang as an example (In Chinese). Journal of Desert Research, 1990, 10 (3): 36—42
- [22] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27 (1): 3—26
- [23] Udden J A. Mechanical composition of clastic sediments. Bulletin of the Geological Society of America, 1914, 25 (1): 655—744
- [24] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. Journal of Geology, 1922, 30 (5): 377—392
- [25] 杨金玲, 李德成, 张甘霖, 等. 土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比. 土壤学报, 2008, 45 (3): 413—419
- Yang J L, Li D C, Zhang G L, et al. Comparison of mass and volume fractal dimensions of soil particle size distributions (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (3): 413—419
- [26] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用. 土壤学报, 2005, 42 (4): 545—550
- Wang G L, Zhou S L, Zhao Q G. Volume fractal

- dimension of soil particles and its applications to land use (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (4): 545—550
- [27] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56 (2): 362—369
- [28] 范冬冬, 李生字, 雷加强, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地高大复杂纵向沙垄区沙丘分形特征. *干旱区地理*, 2009, 29 (6): 941—947
Fan D D, Li S Y, Lei J Q, et al. Fractal features of dunes over the high longitudinal complex ridges in the hinter land of the Taklimakan Desert (In Chinese). *Arid Land Geography*, 2009, 29 (6): 941—947
- [29] 苏里坦, 宋郁东, 陶辉. 不同风沙土壤颗粒的分形特征. *土壤通报*, 2008, 39 (2): 244—248
Su L T, Song Y D, Tao H. Fractal dimension of particle size for different aeolian sandy soils (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39 (2): 244—248
- [30] 孙艳伟, 李生字, 徐新文, 等. 塔克拉玛干沙漠大气降尘粒度特征——以塔里木沙漠公路沿线为例. *干旱区研究*, 2010, 27 (5): 785—792
Sun Y W, Li S Y, Xu X W, et al. Study on grain size characteristics of dustfall in the Taklimakan Desert—A case study along the Tarim Desert highway (In Chinese). *Arid Zone Research*, 2010, 27 (5): 785—792
- [31] 阿如早, 杨特, 同丽嘎. 基于分形理论的沙漠化土地空间结构——以内蒙古多伦县为例. *地理研究*, 2010, 29 (2): 283—290
Aruhan, Yang C, Tongliga. Spatial structure of desertified land based on fractal theory: Taking Duolun County, Inner Mongolia as an example (In Chinese). *Geographical Research*, 2010, 29 (2): 283—290
- [32] 桂东伟, 雷加强, 曾凡江, 等. 塔里木盆地南缘绿洲农田土壤粒径分布分形特征及影响因素研究. *中国生态农业学报*, 2010, 18 (4): 730—735
Gui D W, Lei J Q, Zeng F J, et al. Fractal dimension of particle size distribution and its affecting factors in oasis farmland soils in southern marginal zones of Tarim Basin (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18 (4): 730—735
- [33] 桂东伟, 雷加强, 曾凡江, 等. 绿洲农田土壤粒径分布特征及其影响因素分析——以策勒绿洲为例. *土壤*, 2011, 43 (3): 411—417
Gui D W, Lei J Q, Zeng F J, et al. Characterizing soil particle-size distribution and its variation in farmland of oasis-A case study of Celeoasis (In Chinese). *Soils*, 2011, 43 (3): 411—417
- [34] 朱震达, 陈广庭. *中国土地沙质荒漠化*. 北京: 科学出版社, 1994: 157—179
Zhu Z D, Chen G T. *Sandy desertification of China land* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1994: 157—179

Fractal Characteristics of Grain Size of Sand and Dust in Aeolian Sand Movement in Cele Oasis-Desert Ecotone in Xinjiang, China

MAO Donglei^{1, 2, 3} CAI Fuyan⁴ FANG Dengxian¹ LEI Jiaqiang^{2, 3} LAI Fengbing¹ XUE Jie^{2, 3}
WANG Xuemei¹

(1 College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University/The Key Laboratory "Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone", Urumqi 830054, China)

(2 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

(3 Cele National Station of Observation and Research for Desert-Grassland Ecosystem in Xinjiang, Cele, Xinjiang 848300, China)

(4 College of Application Engineering, Urumqi Vocational University, Urumqi 830002, China)

Abstract 【Objective】 Aeolian sand movement is very frequent in the Cele oasis-desert ecotone in Xinjiang of China. So it is of great importance to explore rules of the near-surface aeolian sand movements, in expectation of providing certain theoretical basis for prevention and control of sandstorms in the southern fringe of the Taklimakan Desert. 【Method】 In-lab measurements and assays, linear regression analysis and correlational statistical analysis were adopted to explore particle size and fractal characteristics of grain size

of the sand and dust materials in sand movements on land surface and near surface over different terrains of the Cele oasis-desert ecotone. 【Result】 Results show that the sand and dust materials in various sand movements consist of five kinds of sand and dust materials, from very coarse silts to very fine sands, and coarse silts are the major component of the atmospheric dustfall, with fractal dimension varying in the range of 0.25 ~ 2.25 and the five kinds of aeolian sand and dust vary in mean fractal dimension of particle size, exhibiting an decreasing order of sand materials on the surfaces of nebkhas > those in dustfall > those on bare flat sandy land > those transported near ground surface > those shifting with sandy, averaging 1.03 ~ 1.67 in fractal dimension of particle size, while standard deviations of their fractal dimension values are in an opposite trend. Along the prevailing wind direction from shifting sandy land to oasis, with growing vegetation coverage, fractal dimension of aeolian sand and dust materials increases, while wind speed declines. The very coarse silt and very fine sand particles in the air higher above the ground surface tend to get deposited around shrubs in the oasis-desert ecotone, so the fractal dimension of the sand and dust materials in nebkhas are the highest in value, while the surface wind speed on shifting sand dunes sparse in vegetation is high, more coarser sand particles get deposited on the surfaces of the shifting sand dunes, being the lowest in fractal dimension. Fractal dimension of the sand materials on the surfaces of nebkhas is linearly related to mean particle size, sorting coefficient and some others. But no such correlation is found with the sand materials on the surfaces of shifting sand dunes. Fractal dimension of the sand materials in nebkhas, shifting sand dunes and sand transported near ground surface is positively related to their clay content at the 0.01 significance level, but negatively related to their content of sand grade of material in nebkhas and sand transported near ground surface; positively related to content of silt grade materials in sand dunes on bare flat land and sand transported near ground surface; negatively related to silt content at the 0.05 significance level in dustfall; but it has nothing to do with silt and sand contents on the surfaces of shifting sand dunes. 【Conclusion】 Particle size fractionation, movement mode, vegetation coverage, wind forces and terrain are the main causes responsible for the differentiation of characteristics of particle size and fractal dimension of the aeolian sand and dust materials in the oasis-desert ecotone.

Key words Oasis-desert ecotone; Nebkhas; Shifting sand dune; Dustfall; Fractal dimension of particle size; Cele

(责任编辑：陈荣府)