

郭晓敏,王海兵,廖承贤,等.苏宏图戈壁地表沉积物组分变异性及其成因[J].中国沙漠,2024,44(5):95-104.

苏宏图戈壁地表沉积物组分变异性及其成因

郭晓敏^{ab},王海兵^{abc},廖承贤^{ab},杨皓钦^{ab},华天红^{ab},刘旭^{ab}

(内蒙古农业大学 a.沙漠治理学院, b.内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室, c.内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 呼和浩特 010011)

摘要: 本文通过对苏宏图戈壁地表0~2 cm及地下10~20 cm土层沉积物的组分测试、相对蚀积率计算及其空间变异性分析,揭示戈壁区域景观地表分异及风沙活动对其粒度的影响。结果表明:苏宏图区域地表可大致分为侵蚀区(轻度、重度)和堆积区。地表沉积物在风力、水力作用的影响下,侵蚀区地表沉积物相对于地下表现为悬移、蠕移及风蚀残余组分增加,跃移组分减少。地表植物稀少,砾石覆盖度高。堆积区地表沉积物相对于地下而言多表现为悬移、跃移组分增加,蠕移及风蚀残余组分减少,地表有沙辫和灌丛沙丘,或新月形沙丘和沙丘链分布。0~2、10~20 cm土层悬移、跃移、蠕移及风蚀残余组分呈中等的空间自相关性(25%~75%),块金值较小,0~2 cm土层各组分变程均大于10~20 cm土层,各组分的空间自相关范围变大,组分的空间连续性增强。

关键词: 沉积物粒度;相对蚀积率;空间变异性;戈壁

文章编号: 1000-694X(2024)05-095-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00029

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

戈壁是中国西北干旱区分布广阔的地理景观^[1],植株矮小,植被稀疏,砾石覆盖是地表最明显的特征。戈壁的形成和发育与地形、气候和风密切相关^[2-3],其中风是戈壁形成、发育演化的基本动力条件,是干旱半干旱区荒漠化重要动力因子,同时是风沙地貌形成演变的重要指标^[4-7]。而风沙地貌是风和沙相互作用的产物,风是塑造地表形态的重要外营力,为沙粒的移动提供动力^[8]。戈壁区原始冲-洪积物长期受到风沙作用,细颗粒物易被吹蚀,粗颗粒残留,搬运动力、碎屑物质的大小导致地表碎屑物质被搬运的距离也不一致^[9-16]。在风沙地貌发育过程中,风力作用不断改变沉积物的颗粒形状、机械组成和矿物成分等^[17],形成了荒漠戈壁、残山丘陵、沙丘及沙丘链,戈壁地貌景观的空间差异明显。目前,苏宏图区域景观地表形成演化的成因尚不明确,研究地区景观地表分异的成因对于丰富和完善风沙地貌学研究具有重要意义。

粒度是碎屑沉积物重要的物理性质^[18-19],碎屑沉积物是具有高度空间异质性的时空连续变异性^[20-21],沉积物颗粒组成会直接影响土壤的物理、化学性质、土壤质地等特征。沉积物粒度的空间变异性是空间位置的函数,是区域风、水动力环境长期作用的结果,但碎屑沉积物的形态和演化过程十分复杂,空间变异性与地形、冲积作用、基岩类型、机械风化作用等结构性因素以及人类活动干扰等随机性因素密切相关,而结构性因素造成的空间自相关性具有不同范围。碎屑沉积物在搬运和堆积过程中记录了丰富的气候环境变化信息^[22-24],沉积物的粒度特征能够有效地反映沉积动力环境等信息,是重建古气候环境研究中重要的代用指标^[25]。利用粒度端元分析(End-member Analysis, EMA)方法在判断沉积物物源^[26]、揭示沉积动力^[27]和重建古气候^[28]等方面取得重要进展。根据沉积物粒度的空间分异性有效分析区域地貌景观分异的成因^[29-32]。基于统计学指标、分形维数以及自然地理学和沉积学等的研究方法^[33-35],可揭示戈壁地表沉积物粒度

收稿日期:2023-11-27; 改回日期:2024-03-06

资助项目:国家自然科学基金项目(42261002,41861001); 高校青年科技英才项目(NJYT22039); 内蒙古自治区高等学校创新团队项目(NMGIRT2408)

作者简介:郭晓敏(1999—),女,内蒙古乌兰察布人,硕士研究生,主要从事荒漠化防治研究。E-mail: guoxiaominsmy@163.com

通信作者:王海兵(E-mail: hbwang@imau.edu.cn)

分布特征是洪水与重力、风力作用等地表过程及干旱的气候环境共同作用的结果,研究均基于沉积物粒度分析中单个样本的粒度参数,对沉积物粒度宏观尺度变异性的解释仍带有定性特点。地统计学方法是以区域化变量理论为基础的空间统计分析方法,从宏观上定量分析沉积物的空间变异性,有效地将沉积物空间变异格局与沉积环境条件联系起来^[36-38]。

苏宏图戈壁地形为高平原、低山丘陵盆地,三面环山。受洪水的影响,碎屑沉积物易在盆地中心汇集,在主导风向影响下,景观具有明显差异,使得该区为研究区域景观地表分异的理想区域。因此,本文以苏宏图区域不同景观地表为研究对象,对戈壁地表0~2 cm和地下10~20 cm土层沉积物的粒度组分进行测试、计算相对蚀积率,并从水平、垂直角度计算其空间变异性,揭示了苏宏图戈壁区域景观地表变异性及成因。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

苏宏图戈壁位于内蒙古阿拉善盟阿拉善左旗,地形南高北低,多为荒漠戈壁及少量残山丘陵(图1)。该区域三面环山,分别为西南部架子山、南部乌力吉山、东南部玛瑙山,为半闭合的盆地。属于典型大陆性气候,常年干旱少雨,年平均降水量不足100 mm,蒸发强烈;年均气温7.3℃;风向为西北风,年平均风速2.1~4.7 m·s⁻¹,最大风速为27.0 m·s⁻¹,全年7~8级大风日数50天左右,大风多出现在3—6月,多为西风或西北风,风大沙多,区域内无常年性地表水,主要靠大气降水补给,水量极度缺乏,几乎无常年地表河流,仅有面状洪流形成的宽浅的干砂河床,强烈的风沙活动带来大量的砂砾物质,形成裸露戈壁、半荒漠戈壁、山间砂砾质地表及沙丘等不同景观类型。

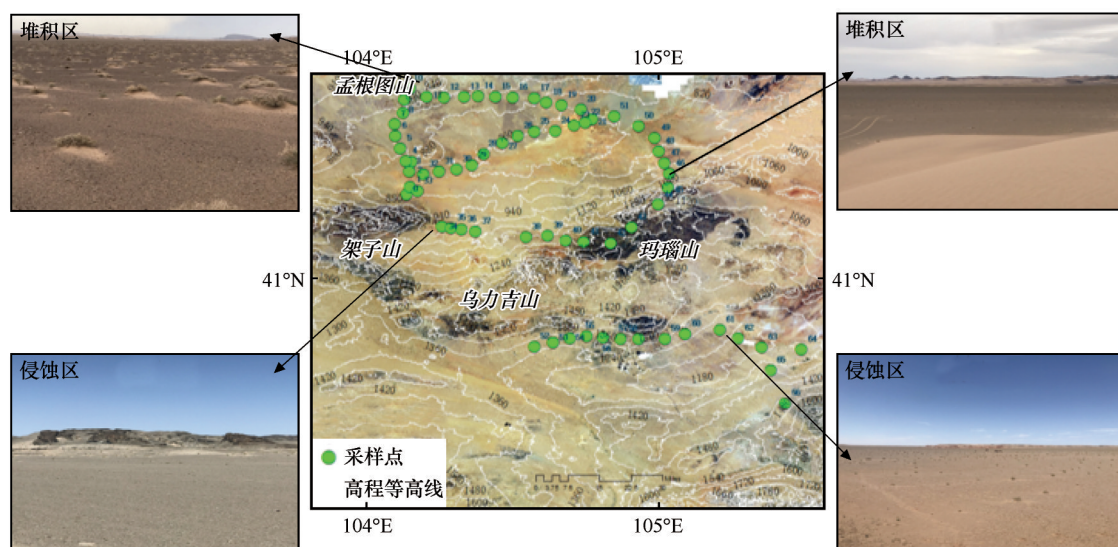


图1 采样点位置

Fig.1 Location of sampling points

区域内主要有灰漠土、盐碱土、沼泽土等土壤类型。植物属荒漠、半荒漠植被类型,植被稀疏,灌木和小灌木占据优势地位,主要分布的植物优势种为白刺,其他天然植被为红砂、梭梭、霸王等。根据蚀积分布特征,可将研究区划分为堆积区、轻度侵蚀区和重度侵蚀区(表1)。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集与测定

为了探究戈壁地表粒度组分在空间上的变化,

对戈壁地表每隔5 km进行1次样品采集,选取地形平坦、地表组成均匀的裸露区域,挖取20 cm×20 cm×20 cm土壤剖面,采集深度为0~2、0~10、10~20 cm的土样1 kg,样点共计67个,用自封袋密封、编号,带回实验室进行粒度筛分。

将地表样品充分混合均匀后称量200 g,利用振筛机将样品筛分,筛分的粒径段采用美国制粒度分级方法^[39],分别为0.005、0.063、0.080、0.100、0.125、0.150、0.200、0.250、0.315、0.400、0.500、0.630、0.800、1.000、1.250、1.600、2.000、4.000、8.000、

表 1 研究区概况
Table 1 Overview of the study area

样点	研究区域	样地情况
9、10、13、16、42~47、49、50、53、54	堆积区	位于山间狭长地带,以小灌木、灌木为主,植物生长情况良好
0~8、11、12、14、15、17~30、32、33、37~41、43、48、51、52、55~60、62~66	轻度侵蚀区	位于山前冲-洪积平原,以小灌木、灌木为主,以轻度侵蚀为主
31、34~36、61	重度侵蚀区	位于山前冲-洪积平原的源头,灌木稀疏,侵蚀较强

16.000、32.000 mm,最终将每一粒径段样品进行称重,记录数据。

1.2.2 数据处理

1.2.2.1 粒度分布曲线与累积曲线的划分

Visher^[40]用概率累积曲线揭示了沉积物搬运方式与粒度分布的关系,被用来推测其形成环境^[41]。概率累积曲线的斜率反映了不同的沉积动力环境^[42],即曲线越陡,说明风沙活动越剧烈、频繁。从线段截点出现的位置来看,研究区内表层风沙沉积物的概率累积曲线主要为三段式。

1.2.2.2 相对蚀积率计算

假设 10~20 cm 土层沉积物为原始沉积物,0~2 cm 土层地表沉积物是经过风力、水力及重力等其他因素影响下的沉积物,将 0~2 cm 和 10~20 cm 土层风蚀残余组分累积质量百分含量的差值比作一段时间后地表的蚀积量。

$$E_r = \frac{R_{0-2} - R_{10-20}}{1 - R_{10-20}} \tag{1}$$

式中: E_r 为蚀积率; R_{0-2} 为 0~2 cm 土层风蚀残余组分累积质量百分含量, R_{10-20} 为 10~20 cm 土层风蚀残余组分累积质量百分含量。当 $R_{0-2} > R_{10-20}$ 为侵蚀戈壁;当 $R_{0-2} < R_{10-20}$ 为堆积戈壁。

1.2.2.3 普通克里金插值

克里金插值(空间局部插值法)是基于统计学的插值方法,可以通过对周围测量值加权来预测未测量位置的值,与反距离权重相似,都属于确定性插值。克里金插值法建立在变异函数理论结构分析的基础上,主要包括计算样本变异函数、根据变异函数对待估计数据建模、利用所建模型进行克里金插值估计和估计方差四大部分。

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \tag{2}$$

式中: $Z^*(x_0)$ 为区域点 x_0 估计值; $Z(x_i)$ 为点 x_i 实测值; λ_i 为主变量 x_i 的权重系数; n 为 x_0 点邻域内的主变量 As 的样本数目。

1.2.2.4 地统计法计算

半变异函数是地统计学的基本计算公式,也是描述区域化变量空间变异特征的主要工具。半变异函数是距离的函数,当区域化变量在采样尺度内存在空间自相关性时,半变异函数可以表征空间变量变异尺度和程度。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \tag{3}$$

式中: $\gamma(h)$ 为取样范围内间距为 h 的所有样点的半方差; $Z(x_i)$ 代表点 x_i 的值; $Z(x_i + h)$ 代表与 x_i 间距为 h 的点; $2N(h)$ 是相距 h 的所有点对的数目。 $\gamma(h)$ 在一定范围内随 h 增大而增大,当测点间距大于最大相关距离时,该值趋于稳定。一般认为半变异函数只有在最大间隔的 1/2 才有意义。

半变异函数拟合可用线状模型、球状模型、指数模型、高斯模型。模型模拟使用地统计学软件 GS+完成。

基台值(C_0+C)表示系统属性最大的变异。块金值(C_0)表示随机变异的大小。结构方差(C)表示系统变异的大小。块金值与基台值的比值($C_0/(C_0+C)$)反映了随机变异占总变异的大小。一般认为块金值/基台值小于 25%时,空间变量为强烈自相关性;在 25%~75%时,为中等空间相关性;大于 75%,为弱空间自相关。变程表示系统属性空间自相关性。

1.2.2.5 其他数据计算

文中数据采用 Excel2016 进行汇总与计算;采用 GS+9.0 进行半方差函数计算以及理论模型的拟合;利用 Origin2022 和 ArcGIS10.7 软件进行作图分析。

2 结果与分析

2.1 沉积物粒度

2.1.1 沉积物粒度特征

沉积物粒度分布曲线可以直观展示沉积物的

粒度分布。可以看出,沉积物粒度呈现多峰态的形式(图2),0~2 cm地层中第一个峰值为0.125 mm左右,第二个峰值在粒径为2 mm左右,同时在粒径0.125~1.6 mm存在小峰区;10~20 cm地层中第一个

峰值为0.15 mm左右,第二个峰值在粒径为4 mm左右,同时在粒径0.15~1.6 mm存在小峰区,表明戈壁地表物质组成具有复杂性,两个地层的峰值存在明显的差异性。

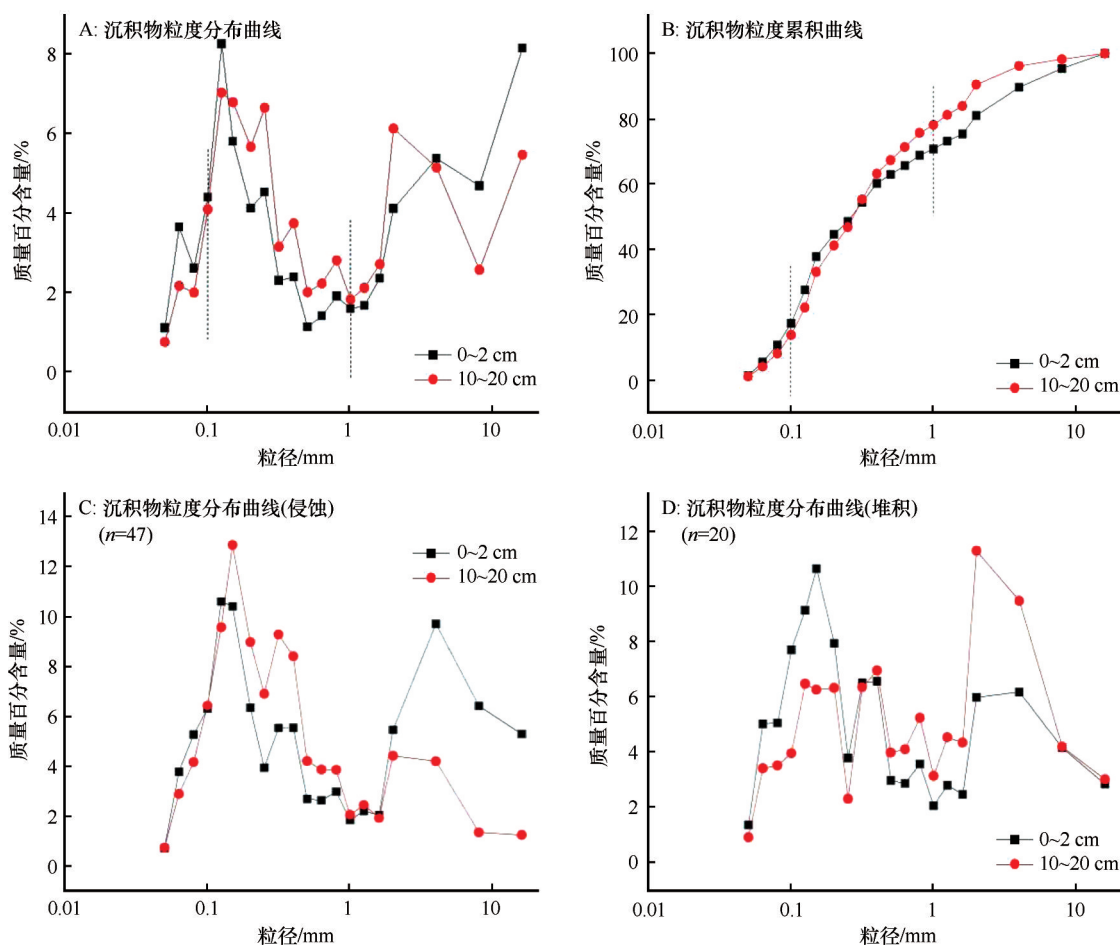


图2 沉积物粒度组分分布及蚀积分布曲线

Fig.2 Distribution of grain size components and erosion and deposition of sediments

沉积物两个地层沉积物中悬移组分、跃移组分和蠕移及风蚀残余组分的含量也显著不同,0~2 cm地层中悬移组分、跃移组分和蠕移及风蚀残余组分的含量分别为10.69%、58.11%、31.2%,10~20 cm地层中悬移组分、跃移组分和蠕移及风蚀残余组分的含量分别为8.06%、67.59%、24.35%。

根据采样点的粒度分布曲线,可以认为苏宏图戈壁大致可分为侵蚀戈壁和堆积戈壁。

2.1.2 沉积物粒度组分的空间分布

戈壁地表沉积物0~2 cm和10~20 cm土层悬移、跃移和蠕移及风蚀残余组分含量在空间上的分布见图3,并结合图4划分蚀积的区域。

堆积区。0~2、10~20 cm土层悬移组分平均值分别为2.79%、2.00%,0~2、10~20 cm土层跃移组分

平均值分别为5.99%、5.31%,0~2、10~20 cm土层蠕移及风蚀残余组分平均值分别为4.14%、5.55%,0~2 cm土层悬移、跃移组分含量大于10~20 cm土层组分含量,0~2 cm土层蠕移及风蚀残余组分小于10~20 cm土层组分含量。堆积区处于山脉之间的狭长地带,受风力作用,细颗粒物质堆积。

轻度侵蚀区。0~2、10~20 cm土层悬移组分平均值分别为2.55%、2.05%,0~2、10~20 cm土层跃移组分平均值分别为5.90%、7.05%,0~2、10~20 cm土层蠕移及风蚀残余组分平均值分别为4.40%、3.02%,0~2 cm土层悬移、蠕移及风蚀残余组分含量大于10~20 cm土层组分含量,0~2 cm土层跃移组分小于10~20 cm土层组分含量。受风力、水力等作用影响下,轻度侵蚀区砂粒质被吹蚀,粗颗粒物质残

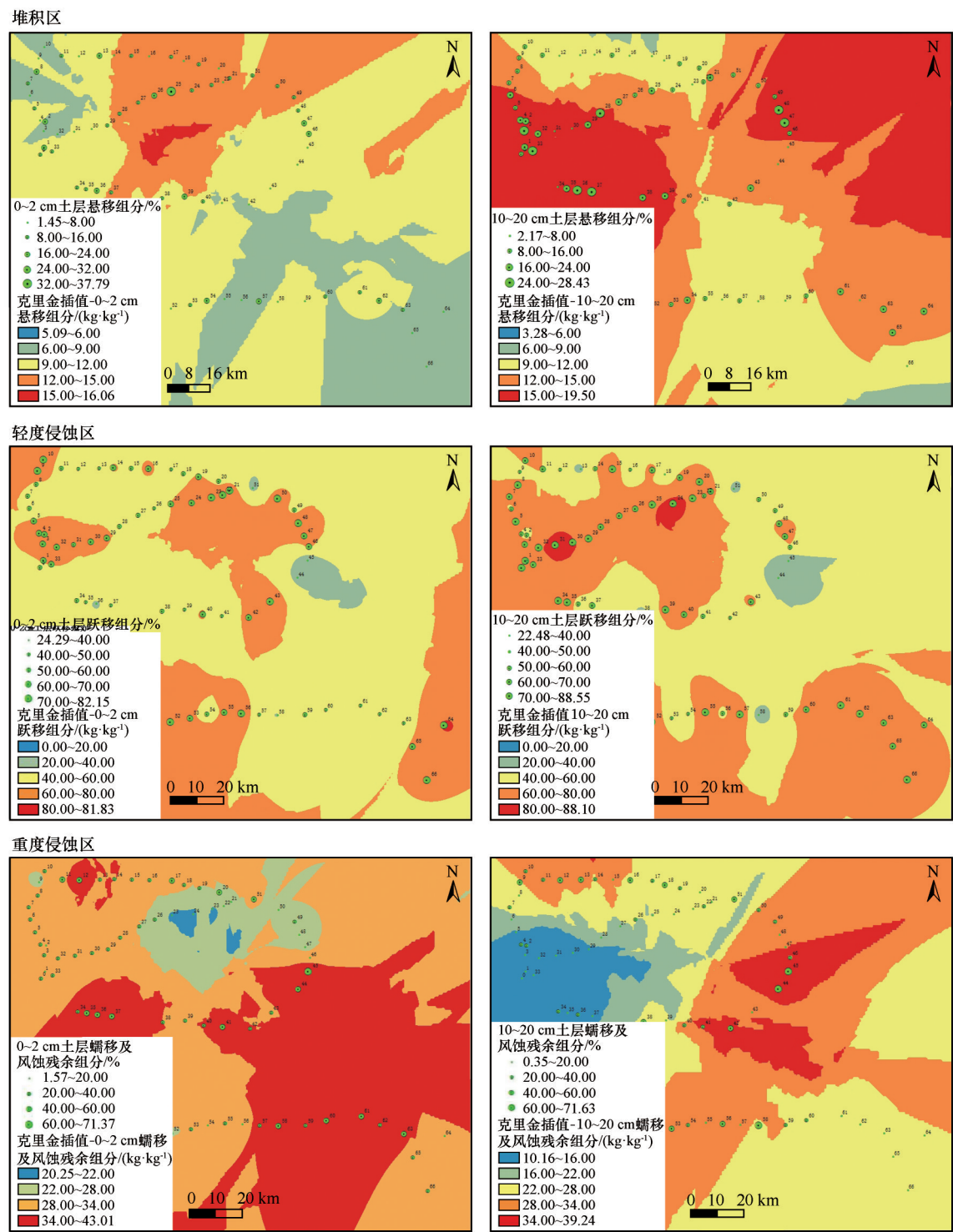


图3 悬移组分、跃移组分、蠕移及风蚀残余组分的空间分布特征

Fig.3 Spatial distribution characteristics of suspended components, saltation components, creep and wind erosion residual components

留,侵蚀较强。

重度侵蚀区。0~2、10~20 cm 土层悬移组分平均值分别为3.11%、1.93%,0~2、10~20 cm 土层跃移组分平均值分别为4.77%、7.92%,0~2、10~20 cm 土层蠕移及风蚀残余组分平均值分别为5.69%、

1.86%,0~2 cm 土层悬移、蠕移及风蚀残余组分含量大于10~20 cm 土层组分含量,0~2 cm 土层跃移组分小于10~20 cm 土层组分含量。受风力、水力等作用影响下,重度侵蚀区细颗粒物质被吹蚀,粗颗粒物质残留,侵蚀较强。

2.2 蚀积分布特征

以戈壁沉积物侵蚀及堆积情况的空间分布,可将研究区划分为堆积区、轻度侵蚀区和重度侵蚀区(图4)。堆积区位于玛瑙山、孟根图山和乌力吉山的山间狭长地带、山间低地及山前风力辐合区,平

均相对蚀积率为 $-8.68 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。轻度侵蚀区位于架子山和乌力吉山的山前冲-洪积平原、丘陵地区,平均相对蚀积率为 $9.91 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。重度侵蚀区位于架子山和乌力吉山的山间垭口处,平均相对蚀积率为 $27.01 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,侵蚀强度较大。

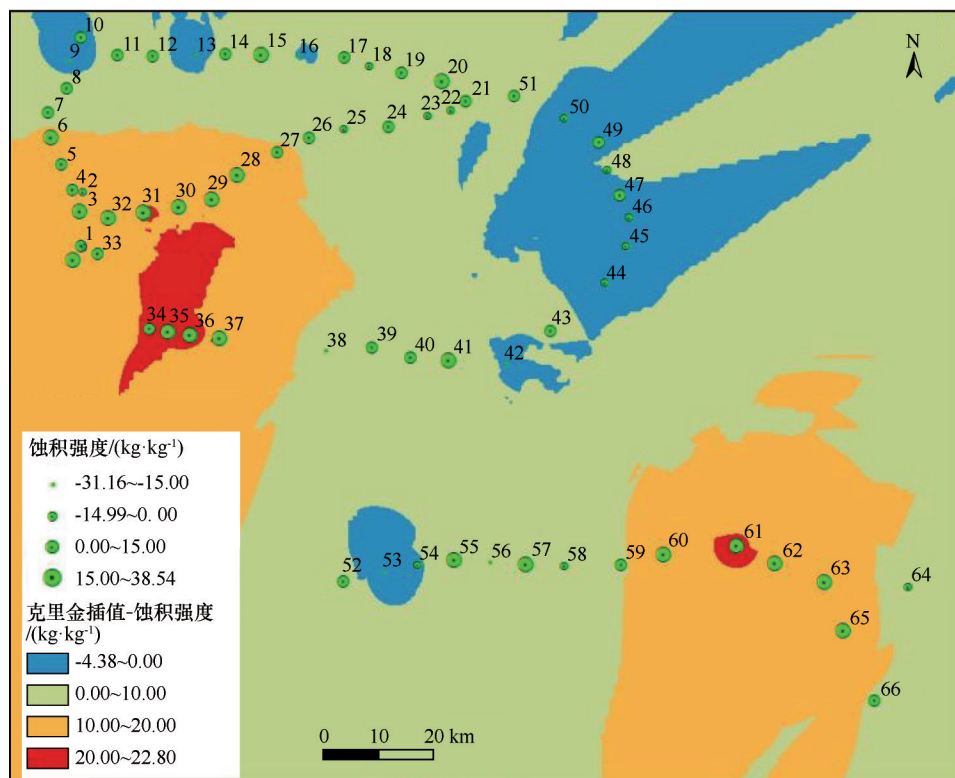


图4 蚀积分布特征

Fig.4 Distribution characteristics of erosion and deposition

2.3 沉积物粒度组分的空间分异

本研究通过对戈壁地表与地下沉积物3种组分(悬移组分 $<0.1 \text{ mm}$ 、跃移组分 $0.1\sim1 \text{ mm}$ 、蠕移及风蚀残余组分 $1\sim20 \text{ mm}$)含量进行半方差模型拟合,得到最佳模型及相关系数(表2)。0~2 cm土层各组分半变异函数拟合的最佳理论模型是指数模型,模型拟合的决定系数比较高,为 $0.552\sim0.71$;10~20 cm土层各组分半变异函数拟合的最佳理论模型是指数模型和球状模型,模型拟合的决定系数也较高,为 $0.489\sim0.629$ (图5)。这说明模型能够较好地反映不同土层、侵蚀强度的空间结构特征。

0~2 cm土层各组分基台值均小于10~20 cm土层,说明10~20 cm土层变异程度更高;0~2 cm土层各组分块金值分别为 0.02488 、 0.02485 、 0.02543 ;10~20 cm土层各组分块金值分别为 0.031 、 0.0273 、

0.0273 ;除了10~20 cm土层悬移组分,0~2 cm和10~20 cm土层各组分均为中等空间自相关性。

0~2 cm土层各组分变程约为 $10.14\sim24.78 \text{ km}$,10~20 cm土层各组分变程约为 $1.2\sim8.03 \text{ km}$,0~2 cm土层各组分变程均大于10~20 cm土层,说明0~2 cm土层受主导风向、风沙活动等影响,导致各组分的空间自相关范围变大。

3 讨论

风沙活动是当风速达到并超过启动风速时,地表上的沙粒开始移动的过程^[43]。Bagnold^[44]认为沙粒运动的基本形式依风力、颗粒质量可分为悬移、跃移和表层蠕移。我们认为戈壁沉积物组分可根据沙粒运动形式划分为悬移组分($<0.10 \text{ mm}$)、跃移组分($0.10\sim1.00 \text{ mm}$)、蠕移及风蚀残余组分($1.00\sim20.00 \text{ mm}$)。根据每一个采样点的沉积物粒度分

表 2 沉积物组分的变异函数理论模型及相关参数

Table 2 Theoretical model of variation function of sediment components and related parameters

变量	理论模型	块金值(C_0)	基台值(C_0+C)	变程/ $(^\circ)$	块基比 $[C_0/(C_0+C)]/\%$	决定系数	残差
0~2 mm 土层悬移组分含量/%	指数模型	0.024880	0.054660	1.098000	54.5	0.710000	3.023×10^{-4}
10~20 mm 土层悬移组分含量/%	球状模型	0.031000	0.927000	0.130000	96.7	0.489000	0.202
0~2 mm 土层跃移组分含量/%	指数模型	0.024850	0.054600	1.092000	54.5	0.710000	3.023×10^{-4}
10~20 mm 土层跃移组分含量/%	指数模型	0.027300	0.059600	0.870000	54.2	0.629000	5.421×10^{-4}
0~2 mm 土层蠕移及风蚀组分含量/%	指数模型	0.025430	0.050960	2.682000	50.1	0.552000	2.123×10^{-4}
10~20 mm 土层蠕移及风蚀组分含量/%	指数模型	0.027300	0.059600	0.870000	54.2	0.629000	1.73

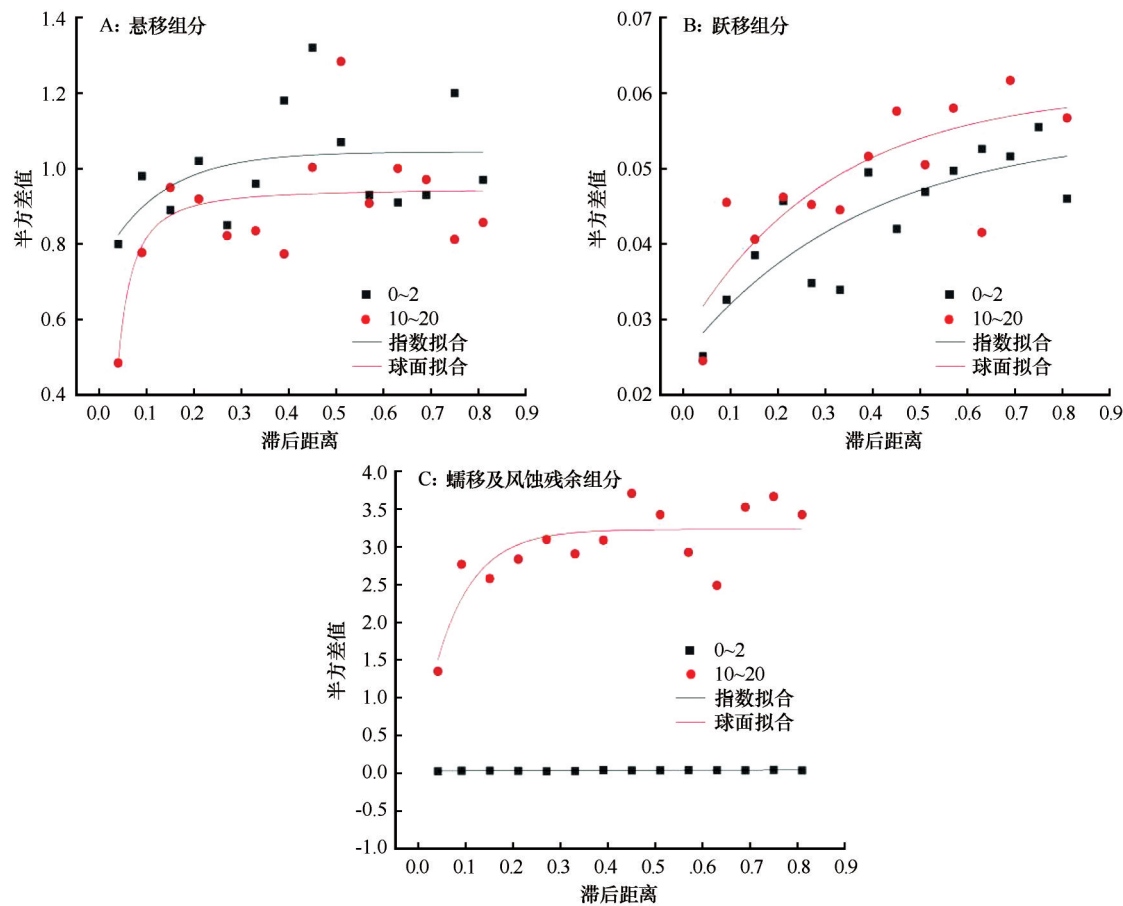


图 5 沉积物组分含量的空间变异

Fig.5 Spatial variation of sediment component content

布、累积曲线,将苏宏图戈壁分为堆积区和侵蚀区(轻度、重度)。

戈壁砾石及碎屑物大多是由山体基岩经物理风化后,经洪水搬运至较远的山麓,形成大片的冲-洪积平原。苏宏图戈壁三面环山,中部为地势较为平坦的平地,全年大风,戈壁沉积物粒径<0.10 mm 的悬移组分与粒径为 0.10~1.00 mm 的跃移组分颗粒被远距离输移释放,而 1.00~20.00 mm 的抗风蚀能力强的蠕移及风蚀残余组分颗粒就近沉积,洪积物表层长时间受到风力侵蚀,在不同地带呈现出不同的戈壁景观。轻度、重度侵蚀区地表沉积物相对于地下而言,多表现为悬移、蠕移及风蚀残余组分增加,跃移组分减少。地表植物稀少,以灌木和小灌木为主,细颗粒物质被吹蚀,砾石裸露。堆积区地表沉积物相对于地下而言多表现为悬移、跃移组分增加,蠕移及风蚀残余组分减少。地表植物稀

疏,以小灌木和抗旱草本植物为主,植物阻沙效果较好,有沙辫和灌丛沙丘,或新月形沙丘和沙丘链分布。

戈壁地表沉积物在地形、风力作用下,相较于地下而言,呈侵蚀状态,细颗粒减少,受山地阻挡出现了局部堆积现象;受洪水、主导风向的影响,砂粒、砂砾由高向低处平原、盆地运移,在微地形影响下,出现局地堆积。这与前人在戈壁上的研究结果相似^[15,44]。通过戈壁地表与地下沉积物累积质量百分含量差值的计算,得出风沙活动对地表沉积物的相对蚀积率,通过地表与地下沉积物含量的对比,揭示戈壁地表景观空间变异的成因以及戈壁地貌形成过程中的风沙活动对其粒度的影响。

地统计结果显示,研究区戈壁地表砾石各组分,在各级别优势不明显,分布相对较均匀;10~20 cm土层悬移组分不适合使用变异函数模型进行组分的空间变化预测,说明这个组分受随机因素影响较大,空间自相关程度很弱;0~2 cm土层悬移、跃移、蠕移及风蚀残余组分和10~20 cm土层跃移、蠕移及风蚀残余组分呈中等的空间自相关性(25%~75%),块金值较小,区域化变量之间具有中等的空间自相关性,而随机因素引起的空间异质性仅占较小比例,该结果的产生可能与部分结构性的影响因素有较大关系。0~2 cm土层各组分变程均大于10~20 cm土层,说明0~2 cm土层受主导风向、洪水和地形等影响,导致各组分的空间自相关范围变大,组分的空间连续性增强。

这与曹晓阳^[45]关于空间异质性的研究结果基本一致。前人研究计算出的各类戈壁空间变异性的块基比为16.7%~32.8%,变程为 $0.243^{\circ}\sim 0.434^{\circ}$ ^[32];河套灌区解放闸灌域土壤质地及各粒级含量空间变异性的块基比为0.02%~47.89%,变程为5.65~63.87 km^[46];古尔班通古特沙漠典型景观土壤质地空间变异性的块基比为0.94%~0.998%,变程为16.58~64.03 km^[47]。本文计算的戈壁沉积物空间变异性的块基比为50.1%~96.7%,变程为0.13~2.68°,地下沉积物受风沙作用小,变程小,地表沉积物受风沙作用及地形、洪水等因素影响,变程较大。

4 结论

堆积区位于玛瑙山、孟根图山和乌力吉山的山间狭长地带、山间低地及山前风力辐合区,平均相对蚀积率为 $-8.68\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。轻度侵蚀区位于架子山

和乌力吉山的山前冲-洪积平原、丘陵地区,平均相对蚀积率为 $9.91\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。重度侵蚀区位于架子山和乌力吉山的山间垭口处,平均相对蚀积率为 $27.01\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$,侵蚀较强。

侵蚀区地表沉积物表现为悬移、蠕移及风蚀残余组分增加,跃移组分减少。地表植物稀少,砾石覆盖度高。堆积区地表沉积物表现为悬移、跃移组分增加,蠕移及风蚀残余组分减少,地表有沙辫和灌丛沙丘,或新月形沙丘和沙丘链分布。

在主导风向、地形影响下,细颗粒减少,受山地阻挡出现了局部堆积现象。在地形、洪水的影响下,由高处向低处汇集,砂粒、砾石向盆地运移,在微地形影响下,出现局地堆积。0~2 cm土层各组分变程均大于10~20 cm土层的,说明0~2 cm土层受主导风向、洪水、地形的影响,导致各组分的空间自相关范围变大,组分的空间连续性增强。

参考文献:

- [1] 朱震达,吴正,刘恕,等.中国沙漠概论[M].北京:科学出版社,1980:107.
- [2] Lancaster N. Dunes of the Gran Desier to sand sea, Sonora, Mexico[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987, 12: 277-288.
- [3] 刘陶,杨小平,董巨峰,等.巴丹吉林沙漠沙丘形态与风动力关系的初步研究[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(6): 1285-1291.
- [4] 朱震达.中国沙漠、沙漠化、荒漠化及其治理对策[M].北京:中国环境出版社,1999:33-47.
- [5] Berkey C P, Morris F K. *Geology of Mongolia*[M]. New York, USA: The American Museum of Natural History, 1927: 33-69.
- [6] 张正偲,董治宝.风沙地貌形态动力学研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(6): 734-747.
- [7] 于涛,林荫堂,郭毅,等.悬移层风沙运动数值模拟[J]. *干旱区地理*, 2004, 27(3): 347-351.
- [8] Qian G Q, Dong Z B, Zhang Z C, et al. Granule ripples in the Kumtagh Desert, China: morphology, grain size and influencing factors[J]. *Sedimentology*, 2012, 59(6): 1888-1901.
- [9] Denny C S. Fan and pediment[J]. *American Journal of Science*, 1967, 256: 81-105.
- [10] Cooke R U, Warren A, Goudie A, et al. *Desert Geomorphology* [M]. Netherlands: CRC Press, 2006.
- [11] Mcfadden L D, Wells S G, Jercinovich M J. Influences of eolian and pedogenic processes on the origin and evolution of desert pavements[J]. *Geology*, 1987, 15(6): 610-613.
- [12] Parsons A J, Abrahams A D, Simanton J R. Microtopography and soil surface materials on semi-arid piedmont hillslopes, southern Arizona[J]. *Journal of Arid Environments*, 1992, 22: 107-115.
- [13] Williams S H, Zimbelman J R. Desert pavement evolution: an

- example of the role of sheetflood[J]. *Journal of Geology*, 1994, 102: 243-48.
- [14] 莫多闻, 朱忠礼, 万林义. 贺兰山东麓冲积扇发育特征[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1999, 35(6): 816-823.
- [15] 董智, 王丽琴, 杨文斌, 等. 额济纳盆地戈壁沉积物粒度特征分析[J]. *中国水土保持科学*, 2013(1): 32-38.
- [16] 周叶, 张露. 疏勒河冲积扇沉积物粒度特征及其古气候环境分析[J]. *科技通报*, 2014, 30(9): 27-33.
- [17] 董治宝, 苏志珠, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [18] 张继义, 王娟, 赵哈林. 沙地植被恢复过程土壤颗粒组成变化及其空间变异特征[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 153-157.
- [19] 王利兵, 胡小龙, 余伟莅. 沙粒粒径组成的空间异质性及其与灌丛大小和土壤风蚀相关性分析[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(3): 688-693.
- [20] 王新中. GIS支持下豫中典型烟田土壤养分空间变异及精准管理[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009.
- [21] 张会茹. 陕西黄绵土养分时空变异及地理特征研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [22] 薛红盼. 青海湖北部地区全新世风成沉积记录的环境[D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所, 2021.
- [23] Li S H, Su N J M. Optical Dating of holocene dune Sands from the Hulun Buir Desert, Northeastern China[J]. *The Holocene*, 2006, 16(3): 457-462.
- [24] 靳鹤龄, 董光荣, 苏志珠, 等. 全新世沙漠-黄土边界带空间格局的重建[J]. *科学通报*, 2001, 46(7): 538-543.
- [25] 董光荣, 李保生, 高尚玉, 等. 鄂尔多斯高原第四纪古风成沙的发现及其意义[J]. *科学通报*, 1983, 28(16): 998-1001.
- [26] 方海超, 黄朋, 孙家文, 等. 鸭绿江端元粒度分级样品常量元素控制因素分析及物源识别[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(3): 72-83.
- [27] 陈海涛, 孔凡彪, 徐树建, 等. 庙岛群岛晚更新世以来黄土粒度端元揭示的粉尘堆积过程[J]. *第四纪研究*, 2021, 41(5): 1306-1316.
- [28] 黎武标, 李志文, 王志刚, 等. 粒度端元揭示的芝罘剖面末次间冰期-末次冰期气候环境变化特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(2): 177-187.
- [29] 汪成昊, 许捍卫. 黄海东海陆架表层沉积物粒度的空间变异特征[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2020, 15(4): 23-28.
- [30] 熊鑫. 戈壁地表沉积物全粒径变异性及其对风沙活动的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [31] 展秀丽, 吴伟. 宁夏白芨滩防沙治沙区风沙土粒度组成特征及空间异质性[J]. *甘肃农业大学学报*, 2017, 52(3): 84-89.
- [32] 刘茜雅, 王海兵, 左合君, 等. 苏宏图戈壁沉积物分形空间变异性及其成因[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(1): 168-177.
- [33] 张德魁, 安富博, 赵艳丽, 等. 甘肃河西走廊典型戈壁土壤粒度特征分析[J]. *中国水土保持*, 2020(11): 41-45.
- [34] 高君亮, 吴波, 庞营军, 等. 内蒙古狼山东麓堆积戈壁表层沉积物粒度特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(11): 97-103.
- [35] 曹晓阳, 冯益明. 噶顺戈壁地表砾石粒度特征分析[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(1): 46-52.
- [36] 马宁远, 王惠卿, 张伟, 等. 基于地统计学的新疆棉田烟粉虱(*Bemisia tabaci* (Gennadius)) 危害动态与时空分布[J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2654-2662.
- [37] 潘颜霞, 王新平, 苏延桂, 等. 荒漠人工固沙植被区土壤性状的空间分布特征[J]. *土壤学报*, 2007, 44(5): 943-948.
- [38] 王天阳, 王国祥. 昆承湖水水质空间分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(8): 1384-1390.
- [39] 李天杰, 赵烨, 张科利, 等. 土壤地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 36-38.
- [40] Visher G. Grain size distributions and depositional processes[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1969, 39(3): 1074-1106.
- [41] 朱秉启. 中纬度荒漠区河西走廊沙丘地貌的演化特征及其环境指示[J]. *地理学报*, 2021, 76(11): 2710-2729.
- [42] 冯铄, 刘志飞, Sompongchaiyakul P, 等. 泰国湾表层沉积物陆源碎屑的粒度特征及其展现的沉积动力环境[J]. *地学前缘*, 2022, 29(4): 211-220.
- [43] Chewings V H, Bastin G N, Crawford M M, et al. Characterisation of vegetation components in the Australian arid zone using EO-1 hyperion imagery[C]// *Proceedings of the 11th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference*. Brisbane, Queensland, Australia: The Remote Sensing and Photogrammetry Association of Australia Ltd., 2002: 634-646.
- [44] Bagnold R A. The physics of sand and dunes[J]. *Nature*, 2009, 457: 1084.
- [45] 曹晓阳. 戈壁表面砾石粒径高光谱遥感反演及其空间分异规律研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [46] 张娜, 张栋良, 屈忠义, 等. 内蒙古河套灌区区域土壤质地空间变异分析: 以解放闸灌域为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(12): 155-163.
- [47] 冯雷. 古尔班通古特沙漠土壤理化性质的空间变异及对植物多样性的影响[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2016.

Spatial variability and its genesis of surface sediments in Suhongtu Gobi

Guo Xiaomin^{ab}, Wang Haibin^{abc}, Liao Chengxian^{ab}, Yang Haoqin^{ab}, Hua Tianhong^{ab}, Liu Xu^{ab}

(a.College of Desert Control Science and Engineering / b.Inner Mongolia Key Laboratory of Aeolian Physics and Desertification Control Engineering / c.Inner Mongolia Hangjin Desert Ecosystem National Positioning Observation and Research Station, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, China)

Abstract: In this paper, the composition test, relative erosion rate calculation and spatial variability analysis of 0–2 cm surface and 10–20 cm underground sediments in Suhongtu Gobi are used to reveal the influence of landscape surface differentiation and wind sand activity on grain size. The results show that the surface of the Suhongtu map can be roughly divided into erosion areas (light, heavy) and accumulation areas. Under the influence of wind and hydraulic action, the residual components of suspended, creep and wind erosion increase, and saltation components decrease. The surface vegetation is sparse and the gravel coverage is high. Compared with the underground, the surface sediments in the accumulation area mostly show the increase of suspended and saltation components, the decrease of creep and wind erosion residual components, and the distribution of sand braided and scrub dunes, or barchan dunes and dune chains on the surface. The suspension, saltation, creep and wind erosion residual components in 0–2 cm and 10–20 cm soil layers show moderate spatial autocorrelation (25%–75%), and the nugget value is small. The variation range of each component in 0–2 cm soil layer is greater than that in 10–20 cm soil layer, and the spatial autocorrelation range of each component is larger and the spatial continuity of each component is enhanced.

Key words: sediment granularity; relative erosion rate; spatial variability; gobi