

姜俊鹏,蔡迪文,马文勇,等.浑善达克沙地风蚀物粒度和元素分异特征[J].中国沙漠,2024,44(5):143-154.

浑善达克沙地风蚀物粒度和元素分异特征

姜俊鹏^{1,2}, 蔡迪文^{2,3}, 马文勇^{2,4}, 焦琳琳²

(1.中铝环保节能集团有限公司,北京 102209; 2.中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101; 3.岭南师范学院地理科学学院,广东 湛江 524048; 4.中国科学院空天信息创新研究院 数字地球重点实验室,北京 100094)

摘要:为探究浑善达克沙地风蚀物粒度和化学元素的分异特征及相互关系,通过风洞试验分析了不同风速下风蚀物的粒径级配、粒度分布频率曲线和粒度参数等特征以及风蚀物元素含量的变化规律。结果表明:土壤风蚀速率与风速符合指数函数关系,不同风速下风蚀物的粒度分布曲线皆为单峰且峰态皆非常宽,平均粒径 $2.46\sim 2.58\Phi$,分选性较差,呈极度正偏。风蚀物中元素含量随风速变化模式主要包括连续下降型、“W”下降型和先升后降型,大部分元素含量与风蚀物中 $<125\mu\text{m}$ 部分极显著正相关关系,而与 $125\sim 500\mu\text{m}$ 部分极显著负相关。

关键词:风洞试验; 化学元素; 粒度; 分异特征; 浑善达克沙地

文章编号: 1000-694X(2024)05-143-12

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00045

中图分类号: S152

文献标志码: A

0 引言

粒度是土壤的重要自然属性,粒级组合特征不仅与成土母质关系密切^[1],也受区域外营力蚀积作用的影响^[2-3]。土壤粒级组合通过影响土壤水分、空气和养分状况^[4-5],对植物生长产生影响^[6]。土壤中的元素主要来自原生岩石,但在自然因素(风、降雨、地形)和人类活动的干扰下会发生迁移,造成元素的分异和富集^[7-9]。在干旱半干旱地区,强烈的风、水营力作用,使土壤的粒度组成及化学元素表现出较强的空间异质性^[10]。风蚀造成的土壤结构分异与营养元素迁移富集,直接影响着植物群落的组成与生理活力,决定着生态系统的结构、功能和生产力水平^[11-14]。充分认识风蚀过程中土壤粒度和元素的分异特征,是进行土壤地力和营养元素管理的基础,也为干旱区荒漠化土壤质量的恢复和改良、植被修复和水土保持提供理论依据。

目前,国内外针对风蚀过程中粒度和元素分异特征的研究已经取得了一定的成果。Larney等^[15]指出,风积物中细粒组分含量高,同时总氮、有机

碳、有效磷和无机氮等植物营养元素的含量也较高,而风蚀地的表土流失会造成土壤肥力下降。Visser等^[16]在萨赫勒地区的观测也表明,跃移组分集中了沉积物的绝大部分质量,因此对土壤养分流失的贡献不可忽略。另外,风洞试验也证明了粒度和元素随风速的分异特征,Wang等^[3]发现风蚀物中的粉砂和黏土组分含量与风速负相关,而沙粒组分则正相关,部分元素的含量也表现风速依赖性。然而,风蚀过程中元素对粒度的依存关系尚未取得明确认识。

浑善达克沙地位于内蒙古自治区的锡林郭勒高原,由于气候变化、人类活动等多重因素的影响,浑善达克沙地正面临着严重的生态环境问题。其中,风蚀过程是该地区环境退化的主要原因,表现为表土颗粒粗化以及土壤有机质和氮磷等营养元素大量流失,最终改变植被格局、加剧植被退化和沙漠化^[16]。研究者运用多种技术和方法,对浑善达克沙地的风蚀规律、沙尘暴的形成机制等进行了深入研究^[17-19],也关注浑善达克沙地的生态保护、环境治理等问题^[20-21],然而针对浑善达克沙地风蚀过程中粒度和元素分异特征及其相互关系和影响机制

收稿日期:2024-02-21; 改回日期:2024-04-15

资助项目:国家自然科学基金项目(42301003,41930640);国家重点研发计划项目(2023YFC3708905)

作者简介:姜俊鹏(1988—),男,河南平顶山人,博士,主要从事生态修复研究。E-mail: loujp.2019@tsinghua.org.cn

通信作者:蔡迪文(E-mail: caidw@lingnan.edu.cn)

的研究较少。本文通过风洞模拟试验研究浑善达克沙地风蚀过程中粒度和元素的分异特征,从而揭示区域风蚀规律以及粒度与营养元素的相互作用机理。研究结果可为制定有效的环境保护和治理措施提供科学依据,并为其他类似地区的生态保护和环境治理提供参考借鉴。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

浑善达克沙地位于内蒙古高原中部,阴山余脉

以北、中蒙边界线以南,从大兴安岭南部山地西麓克什克腾旗向西延伸到苏尼特右旗的广大区域(图1),主体部分地理位置在 42° — 45° N、 112° — 118° E,东西长约360 km,南北宽30~100 km,面积约2.14万 km^2 ,在全国十大沙漠(地)中位居第八^[22]。沙地横跨温带季风半干旱和干旱气候区,受东亚季风环流控制,降水自东南向西北由400 mm向200 mm递减,区域年蒸发量为1 680~2 940 mm,干燥度1.2~2。沙地年均风速为 $3.5\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,冬、春风力较为强劲,盛行西风和西北风,区域年大风日数为50~80 d。

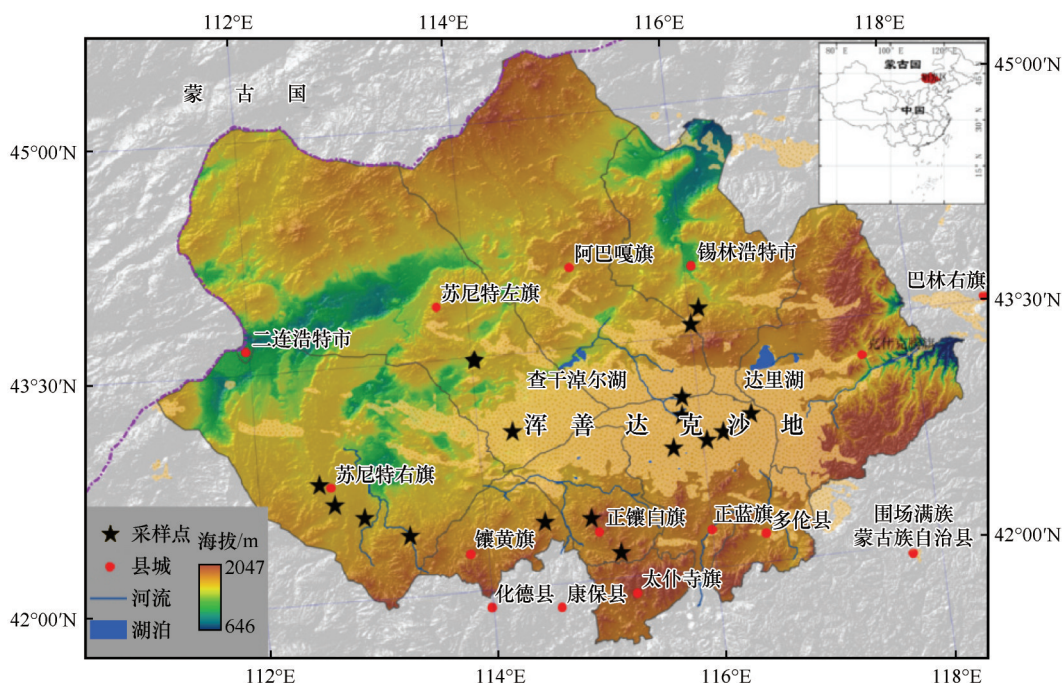


图1 浑善达克沙地采样点位置分布图

Fig.1 Distribution of sampling sites in the Otindag Sand Land

1.2 样品采集与试验方法

野外采样工作开展于2017年7月,为了使所采集样品能较好代表浑善达克沙地整体土壤退化情况,共采集了不同退化程度的表层土壤(0~30 cm)样品20个。采样时,用干净的铁锹取表土30 kg左右,带回实验室风干保存,用以后续风洞试验,采集样品的更多信息详见文献[23]。

风洞试验开展于中国科学院西北生态环境资源研究院的风洞实验室,该风洞参数详见文献[24]。样品放置在样品槽中,在样品槽下风向10 cm处放置集沙盒(尺寸为 $0.3\text{ m}\times 0.3\text{ m}$),用以收集风蚀物。试验风速从 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 开始,间隔 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 递增到 $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,

每个风速下试验60 s,收集样品并称重。风洞试验前后,需要分别采集风洞样品槽中的表层土样,分别命名为“表土样”和“蚀余物”。收集到的所有样品均进行粒度和元素含量测定。

土壤样品的粒度测定于兰州大学西部环境教育部实验室,使用仪器为Malvern公司生产的Mastersizer2000激光粒度仪,可测粒径为 $0.02\sim 2\,000\text{ }\mu\text{m}$,样品预处理按该仪器使用说明书制备(<https://www.malvernpanalytical.com.cn/>)。

元素含量测定于中国科学院地理科学与资源研究所理化中心,土壤样品预处理过程详见文献[23],样品消解后使用ICP-OES(Optima 5300DV,

PE,美国)和 ICP-MS(Elan DRC-e,PE,美国)测试微量元素含量。

粒度参数综合反映沉积物粒度特征及搬运介质类型、动力作用机制和环境特征等。常用粒度参数包括平均粒径(M_z)、标准偏差或分选系数(σ)、偏度(SK)和峰度(K_g)等,可使用 Folk-Word 图解法、Friedman 矩法和 McManus 矩法加以计算^[22]。本研究采用 Friedman 矩法计算各粒度参数^[25],由于采用全样的粒级,计算结果更为精确^[26]。

2 结果与分析

2.1 风蚀速率特征

通过风洞试验模拟了 20 个土壤样品在不同

风速下的风蚀速率(表 1)。在风速为 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,土壤样品平均风蚀速率仅为 $0.01\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;在风速为 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,土壤样品平均风蚀速率为 $0.3\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,但有些样点风蚀速率仍然为 0,说明试验风速未达到启动风速。一般浑善达克沙地的启动风速为 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[27],但本试验中,有些样点的启动风速超过了 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,这表明下垫面的土壤性质、植被类型以及人类活动等因素可能影响到土壤的可蚀性。土壤风蚀速率是土壤侵蚀的重要指标,直接体现了土壤的可蚀性特征^[28]。风蚀速率越大,表明区域荒漠化风险相对较高。试验中风蚀速率的变异系数基本大于 100%,为强变异性,也说明了浑善达克地区土壤可蚀性存在着较大空间差异。

表 1 不同风速下土壤样品风蚀速率
Table 1 Characteristics of soil erosion intensity at different wind speeds

参数	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)							
	8	10	12	14	16	18	20	22
最小值/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.00	0.00	0.02	0.10	0.19	0.37	0.52	0.50
最大值/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.08	1.74	5.74	8.73	13.25	23.76	32.07	40.29
平均值/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.01	0.30	1.09	2.30	4.26	7.08	10.29	13.41
CV/%	210.6	176.7	159.3	118.3	99.0	106.8	103.0	102.9

风洞试验表明,浑善达克沙地表层土壤风蚀速率与风速呈指数函数关系(图 2),拟合方程为 $q=0.15\times 1.23^v$, $R^2=0.97$,拟合程度较好。董治宝等^[28]通过风洞试验证实风蚀面在受任何破损率条件下,风蚀率随风速的变化关系一致服从指数函数律,本研究也进一步印证了该研究结论。Houser 等^[29]发现,

当风沙流经过某一风蚀面时,与同等风力条件下净风相比,其风蚀能力会大幅度提高。Gillete 等^[30]也认为跃移颗粒在风蚀起尘过程中起非常重要的作用,而且跃移通量在一定程度上可表征同一风蚀面在垂直方向上的尘通量^[31]。风洞模拟试验受洞体本身的限制,洞内被吹蚀的截面面积较小,无法形成真实风蚀环境中大量跃移颗粒物对风蚀面的击溅过程,风沙流发育程度不充分,这在一定程度上可能低估了风蚀率。

2.2 风蚀物粒度特征

2.2.1 粒径级配

对风蚀物的粒径级配进行统计分析,结果显示风蚀物的粒径级配在不同风速下具有显著差异(图 3)。在风速 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,风蚀物以细沙为主,含量超过了 50%,其次是中沙,含量为 27%,而极粗沙的含量为 0;在风速 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,风蚀物仍以细沙(50.59%)和中沙(30.8%)为主,粗沙含量为 0;在风速 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,风蚀物的极细沙、细沙和中沙的含量分别为 11.88%、41.65% 和 32.17%,粗沙含量仍为 0;

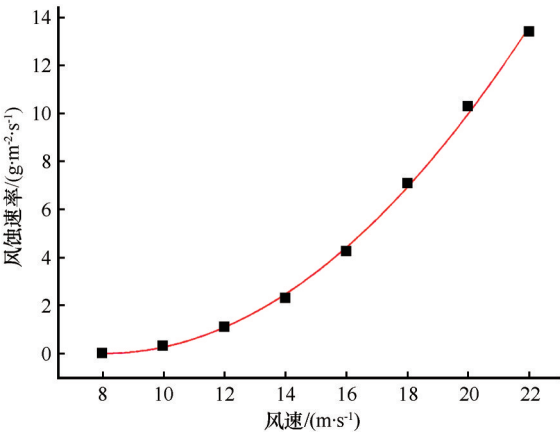


图 2 不同风速下土壤风蚀速率
Fig.2 The relationships between wind velocity and the erosion intensity

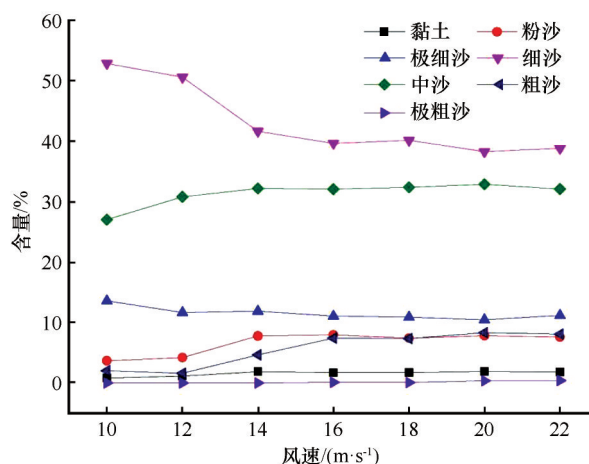


图3 不同风速下风蚀物粒度含量特征

Fig.3 The relationships between wind velocity and the content of different grain size

风速在 $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 至 $22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间的风蚀物中, 粒度组成基本相同, 其中细沙含量大致在 39% 左右, 中沙含量在 32% 左右。

土壤风蚀过程通过侵蚀、分选和沉积等方式改变了地表物质的机械组成, 因此, 深入了解不同风速下表土粒径变化特征不仅有助于全面理解干旱区土壤风蚀过程, 也是认识荒漠区土壤营养元素异质性和地表沙尘释放过程的关键。宗月香^[32]认为, 风蚀过程对浑善达克沙地 0~5 cm 表土层的 0.05~0.25 mm 粒径组分的含量影响显著, 即该组分的含量沿风向有沿程增加的趋势。在本研究中, 浑善达克沙地地表风蚀物, 主要由细沙和中沙组成, 两者含量占 60% 左右, 粉沙和极细沙含量都在 14% 左右, 粗沙和黏土含量分别在 8.8% 和 2.8% 左右, 极粗沙的含量最少, 约 0.5% 左右, 这与前人研究结论一致^[33]。

整体看, 只有在风速大于 $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 风蚀物中极粗沙含量不为 0, 说明浑善达克沙地土壤极粗沙的启动风速大于 $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。另外, 风蚀物中细沙和极细沙含量随着风速的增大, 先明显减少, 后趋于稳定; 黏土、粉沙、中沙和粗沙的含量则随着风速的增大, 先增加后趋于稳定。这反映出风力对物质侵蚀搬运的选择性, 对于单一机械组成的土样, 直径 0.005~0.01 mm 的粉沙具有最大的抗风蚀度, 土壤中粉沙的含量越高, 沙的含量越低, 则风蚀度越低^[34]。本次试验结果也表明, 对于土壤中的沙质颗粒来说, 中沙和细沙最易风蚀, 而粉沙则属于较难蚀颗粒。在浑善达克沙地, 常见风况条件下 (2 m 高处 $7\sim 11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 地表已经发展为严重沙漠化的裸露沙地, 其表层 $\leq 1 \Phi$ (或 $\geq 0.63 \text{ mm}$) 的粗沙属于难蚀部

分^[33], 对易风蚀的细沙部分有保护作用、对严重沙漠化土地的进一步发展有一定的抑制作用。随着风速的增大, 被蚀物质以细沙和中沙细颗粒物为主, 各粒度含量趋于稳定。

2.2.2 粒度分布频率曲线

不同风速下风蚀物的粒度分布模式基本相同, 都为单峰模式 (图 4), 各风速下风蚀物的众数粒径都在 2Φ 附近, 属细沙粒级, 但随风速逐渐增加, 风蚀物的众数粒径含量逐渐降低。另外, 表土样和蚀余物的分布曲线与风蚀物的分布大致相似, 说明浑善达克沙地表层土壤以风成沙为主, 而表土样的峰值相对蚀余物靠右, 说明风蚀导致表层土壤粗化。总体而言, 风蚀物的粒度分布模式基本一致, 皆为单峰, 且随着风速增加, 风蚀物峰值处粒度含量逐渐下降, 土壤表层粒度变粗。

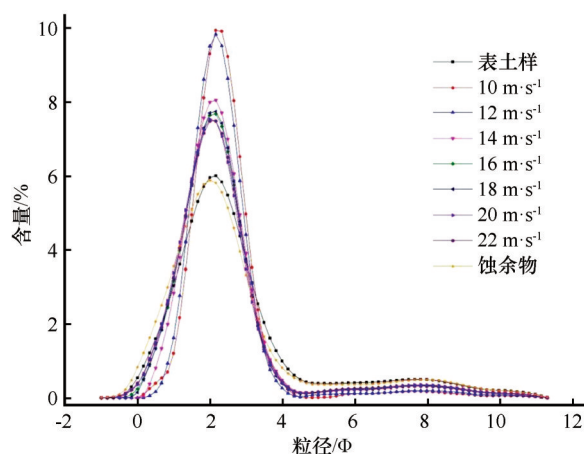


图4 不同风速下风蚀物粒度分布频率曲线

Fig.4 Frequency curves for the grain size under different wind velocity

2.2.3 粒度参数

不同风速下风蚀物的平均粒径为 $2.46\sim 2.58 \Phi$, 在风速 $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 风蚀物平均粒径最细 (表 2)。平均粒径受搬运介质平均动能的影响较大, 在本试验中, 当风速大于 $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 由于受样品粒级的影响, 风蚀物中各粒级含量趋于稳定, 平均粒径变化不大。

不同风速下风蚀物的分选系数为 1.26~1.83, 依照分选等级的划分, 都属于分选较差的等级, 表土样和蚀余物的分选系数为 2.13 和 2.16, 属于分选差的等级。

偏度用以表征粒度频率曲线的对称性, 反映沉积物粒度分布的不对称程度, 并表明众数、中位数、平均值的相对位置, 因此, 该参数能反映沉积物搬

表 2 不同风速下风蚀物粒度参数

Table 2 Grain size parameters in wind blow sediment at different wind velocity

粒径参数	表土样	风速/(m·s ⁻¹)							蚀余物
		10	12	14	16	18	20	22	
平均粒径 M_z/Φ	2.86	2.46	2.46	2.58	2.51	2.50	2.49	2.48	2.72
分选系数 σ	2.13	1.26	1.38	1.75	1.77	1.76	1.83	1.78	2.16
偏度 SK	1.70	3.32	3.27	2.48	2.34	2.41	2.31	2.33	1.73
峰态 K_g	5.65	17.66	15.98	9.58	9.02	9.36	8.78	9.13	5.74

运的介质类型及搬运能力的强弱^[35]。风蚀物的偏度均大于 0, 为正偏度, 表明风蚀物以粗组分为主。整体上, 浑善达克沙地风蚀物的偏度都大于 1.5, 为极度正偏, 反映了风力搬运特征。

峰态是刻画数据在平均粒度两侧集中程度的参数, 代表频率曲线两头与中间分选性之间的比率, 或表示频率曲线尾部展开度与中部展开度之比, 用来衡量沉积物频率分布曲线峰形的宽窄陡缓程度。本试验统计结果显示, 不同风速下风蚀物的峰态处于 8.78~17.66, 按照分级标准, 风蚀物的峰态皆为非常宽, 反映风蚀过程相对较差的分选性。

2.3 风蚀物元素特征

2.3.1 不同风速下风蚀物元素含量

试验结果显示, 浑善达克沙地风蚀物中主要有 Al、Ca、Fe、Na、K、Mg、Ti、Mn、P、Ni、Zn、Cu、Ba、Rb、Sr、Li、Sc、V、Mo、Ag、Co、Tl、Cs、Ga、La、Ce、Nd、U、Be、Y、Pr、Bi、Cd、In、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、

Tm、Yb 和 Lu 等 48 种元素。对这些元素的含量进行统计分析发现, 不同风速下风蚀物元素含量存在较大差异(表 3)。整体而言, 不同风速下风蚀物的元素主要由 Al、Ca、Fe、Na、K、Mg、Ti 等组成, 元素含量都超过 1%, 为土壤中的大量元素; 元素 P、Ba、Mn、Sr 和 S 的含量较高, 在风蚀物中的含量均大于 100 mg·kg⁻¹; 其余元素的含量较低, 如 Bi、Cd、In、Tm 和 Lu 的平均含量不足 1 mg·kg⁻¹, In 的含量最低, 平均含量为 0.02 mg·kg⁻¹。

2.3.2 不同风速下风蚀物元素含量变化特征

风蚀过程中, 沉积物中地球化学元素会发生变异和分选。Wang 等^[3]对阿拉善高原地表物质的风洞试验表明, Cu、As、Pb、Mn、Zn、Al、Ca、Fe、Ga、K、Mg、P、Rb、Co、Cr、Na、Nb、Si 和 Zr 在风蚀过程中发生显著分异。在对浑善达克沙地风蚀物中元素含量的进一步分析发现, 风蚀过程中, 风蚀物中不同元素含量与风速主要有 3 种关系, 分别是连续下降型、“W”下降型和先升后降型。

表 3 不同风速下风蚀物元素含量

Table 3 The concentration of chemical elements in wind blow sediment at different wind velocity

元素含量	风速/(m·s ⁻¹)							
	8	10	12	14	16	18	20	22
Al ₂ O ₃ /%	9.01	9.12	8.80	8.84	8.27	8.16	8.35	8.27
CaO/%	1.64	1.52	1.34	1.35	1.18	1.22	1.13	1.19
Fe ₂ O ₃ /%	2.01	1.98	1.87	1.67	1.72	1.66	1.68	1.62
K ₂ O/%	3.01	3.04	2.99	2.96	2.87	2.89	2.83	2.84
MgO/%	0.61	0.60	0.56	0.54	0.50	0.50	0.47	0.49
Na ₂ O/%	2.14	1.97	1.91	1.79	1.97	1.84	1.78	1.79
Ti/(mg·kg ⁻¹)	2 033.63	1 865.10	1 624.62	1 525.46	1 410.91	1 428.78	1 425.96	1 393.84
P/(mg·kg ⁻¹)	443.66	418.46	399.27	308.63	423.21	365.48	357.10	332.35
Ba/(mg·kg ⁻¹)	728.41	726.54	689.41	704.10	663.93	689.00	647.65	684.85
Cr/(mg·kg ⁻¹)	51.40	54.33	70.37	44.12	42.79	39.64	39.15	37.80

续表 3

元素含量	风速/(m·s ⁻¹)							
	8	10	12	14	16	18	20	22
Li/(mg·kg ⁻¹)	15.96	16.23	15.05	14.66	14.20	14.27	13.48	13.78
Mn/(mg·kg ⁻¹)	293.47	298.42	267.88	250.17	247.62	234.39	232.61	228.05
Ni/(mg·kg ⁻¹)	10.03	10.52	9.86	9.05	8.65	8.66	8.65	8.28
Yb/(mg·kg ⁻¹)	1.25	1.17	1.12	1.08	1.14	1.01	1.13	1.06
Lu/(mg·kg ⁻¹)	0.18	0.18	0.17	0.16	0.15	0.15	0.16	0.15
Mo/(mg·kg ⁻¹)	0.66	0.96	1.46	1.40	1.19	0.86	0.71	0.82
Be/(mg·kg ⁻¹)	1.41	1.37	1.30	1.27	1.20	1.27	1.21	1.19
Y/(mg·kg ⁻¹)	13.20	13.08	11.78	11.66	11.01	10.90	11.65	11.10
La/(mg·kg ⁻¹)	18.35	18.37	16.73	16.40	14.73	15.83	14.07	15.72
Bi/(mg·kg ⁻¹)	0.16	0.16	0.15	0.15	0.14	0.14	0.13	0.14
U/(mg·kg ⁻¹)	0.84	0.77	0.74	0.70	0.64	0.69	0.64	0.69
Pr/(mg·kg ⁻¹)	3.37	3.38	3.03	2.94	2.65	2.93	2.58	2.81
V/(mg·kg ⁻¹)	33.19	33.27	30.24	29.60	26.13	28.33	27.79	28.06
Cu/(mg·kg ⁻¹)	26.13	23.10	18.47	18.24	19.19	18.84	16.28	19.70
Zn/(mg·kg ⁻¹)	52.39	43.59	39.85	38.09	39.88	40.88	36.21	36.99
Ag/(mg·kg ⁻¹)	0.04	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04
Cd/(mg·kg ⁻¹)	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Ga/(mg·kg ⁻¹)	10.43	10.29	10.00	9.90	9.48	9.96	9.25	9.70
Gd/(mg·kg ⁻¹)	1.24	1.22	1.12	1.08	0.97	1.02	0.98	1.02
As/(mg·kg ⁻¹)	21.05	18.78	15.91	14.70	16.45	17.87	14.97	15.48
Tb/(mg·kg ⁻¹)	0.27	0.26	0.24	0.24	0.21	0.22	0.22	0.22
Co/(mg·kg ⁻¹)	4.43	4.55	4.29	3.97	3.91	3.76	3.63	3.67
Tl/(mg·kg ⁻¹)	0.51	0.50	0.50	0.48	0.47	0.47	0.45	0.46
Cs/(mg·kg ⁻¹)	3.27	3.38	3.53	3.57	3.23	3.09	2.83	2.97
In/(mg·kg ⁻¹)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Rb/(mg·kg ⁻¹)	94.65	93.41	93.26	91.56	86.91	89.32	86.06	87.91
Ce/(mg·kg ⁻¹)	35.28	34.79	31.17	30.89	27.28	29.93	26.47	29.00
Nd/(mg·kg ⁻¹)	12.77	13.03	11.46	11.00	9.90	11.00	9.70	10.32
Sm/(mg·kg ⁻¹)	2.60	2.56	2.32	2.27	2.06	2.20	2.05	2.14
Eu/(mg·kg ⁻¹)	0.72	0.70	0.66	0.67	0.61	0.61	0.61	0.61
Dy/(mg·kg ⁻¹)	1.65	1.58	1.48	1.42	1.31	1.34	1.39	1.35
Ho/(mg·kg ⁻¹)	0.45	0.44	0.41	0.39	0.36	0.37	0.39	0.38
Er/(mg·kg ⁻¹)	1.03	0.98	0.89	0.90	0.82	0.84	0.87	0.85
Tm/(mg·kg ⁻¹)	0.24	0.24	0.22	0.21	0.20	0.20	0.21	0.20
Pb/(mg·kg ⁻¹)	16.30	14.44	13.06	13.17	13.05	13.49	11.73	12.40
Sc/(mg·kg ⁻¹)	5.57	5.56	4.93	4.47	4.36	4.39	4.30	4.54
Sr/(mg·kg ⁻¹)	206.64	205.11	188.47	194.39	179.08	181.98	180.00	182.85
S/(mg·kg ⁻¹)	413.97	340.70	329.85	278.75	398.12	350.13	300.66	322.29

连续下降型。在该模式下,风蚀物中元素含量随着风速增大而减小,代表元素主要有CaO、MgO、Bi和Fe₂O₃。由图5可知,在风蚀过程中,风蚀物中

元素含量随着风速的增大而逐渐减小,在较低风速时(8 m·s⁻¹),风蚀物中上述元素含量最高,随着风速增大,元素含量迅速减少。

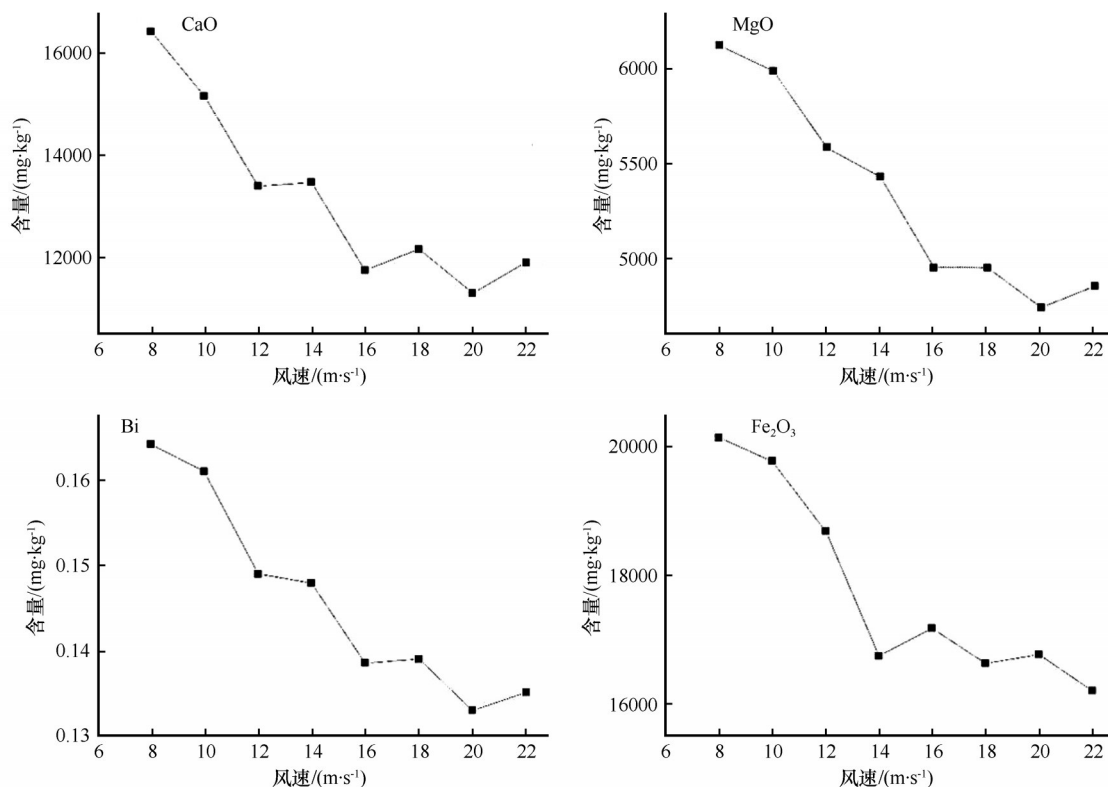


图5 风蚀物元素含量与风速关系(I)

Fig.5 The relationship of wind velocity and elements contents of transported material (I)

“W”下降型。在该模式下,风蚀物中元素含量呈“W”型减少,即随着风速增大先迅速减少,然后随着风速增大再增加,然后随着风速增加又减小,代表元素主要有P、S、Na和As(图6)。具体表现为,在风蚀过程中,风速从8 m·s⁻¹递增到14 m·s⁻¹时,风蚀物中这4种元素含量逐渐减小,并在14 m·s⁻¹时降至最低,但当风速达到16 m·s⁻¹时,上述元素含量又急剧增加,而风速从18 m·s⁻¹递增到22 m·s⁻¹时,元素含量又呈降低趋势。

先升后降型。该模式与连续下降型相似,差别在于该模式下,风蚀物中元素含量随着风速增大先增加后又减小,代表元素主要有Al₂O₃、Ni、K₂O和Mn(图7)。在风蚀过程中,风速从8 m·s⁻¹递增到10 m·s⁻¹时,风蚀物中元素含量逐渐增大,然后随着风速的进一步增大,风蚀物中元素含量趋于减少。

2.4 风蚀过程粒度和元素相互关系

沉积物中元素含量与沉积物粒度组成有着密切的关系,相关研究表明细颗粒物中富含营养元素^[36],风蚀过程中,细颗粒物被吹蚀的同时也

带走大量营养元素,造成土壤贫瘠,荒漠化加重。在浑善达克沙地,研究发现P元素的含量与土壤20~50 μm和50~100 μm的组分密切相关^[23],具有不同机械组成的风蚀物中元素含量存在较大差异。

风蚀物粒径组成与元素含量间的相关性分析结果如表4所列。Al₂O₃和Zn元素含量与黏土和极细沙含量显著正相关,而与粉沙和中沙则显著负相关;Fe₂O₃、MgO、Ti、Lu、Li、Mn、Ni、Pb、Sc、V、Ag、Cd、Gd、Co、Cs、In、U、Bi、Be、Y、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Tb、Dy、Ho、Er含量与黏土、粉沙和极细沙的含量极显著正相关,与细沙和中沙的含量极显著负相关;CaO和Cr含量与黏土和粉沙极显著正相关,与细沙含量极显著负相关,与其他粒级没有显著相关性;K₂O和Ba含量则与黏土和粉沙极显著负相关,而与细沙含量极显著正相关;Tl和Rb含量与粉沙和中沙含量极显著负相关,而与极细沙含量极显著正相关;此外,S元素与各粒径组分含量间没有显著性相关关系。

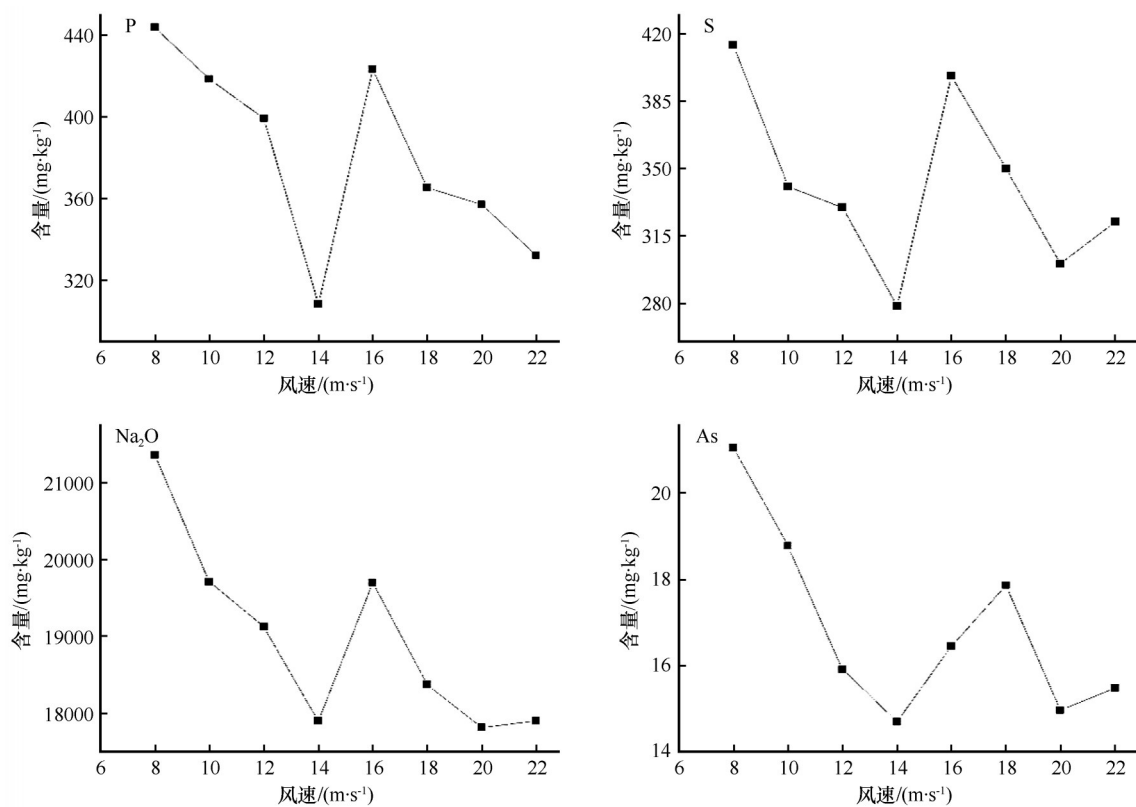


图6 风蚀物元素含量与风速关系(II)

Fig.6 The relationship of wind velocity and elements contents of transported material (II)

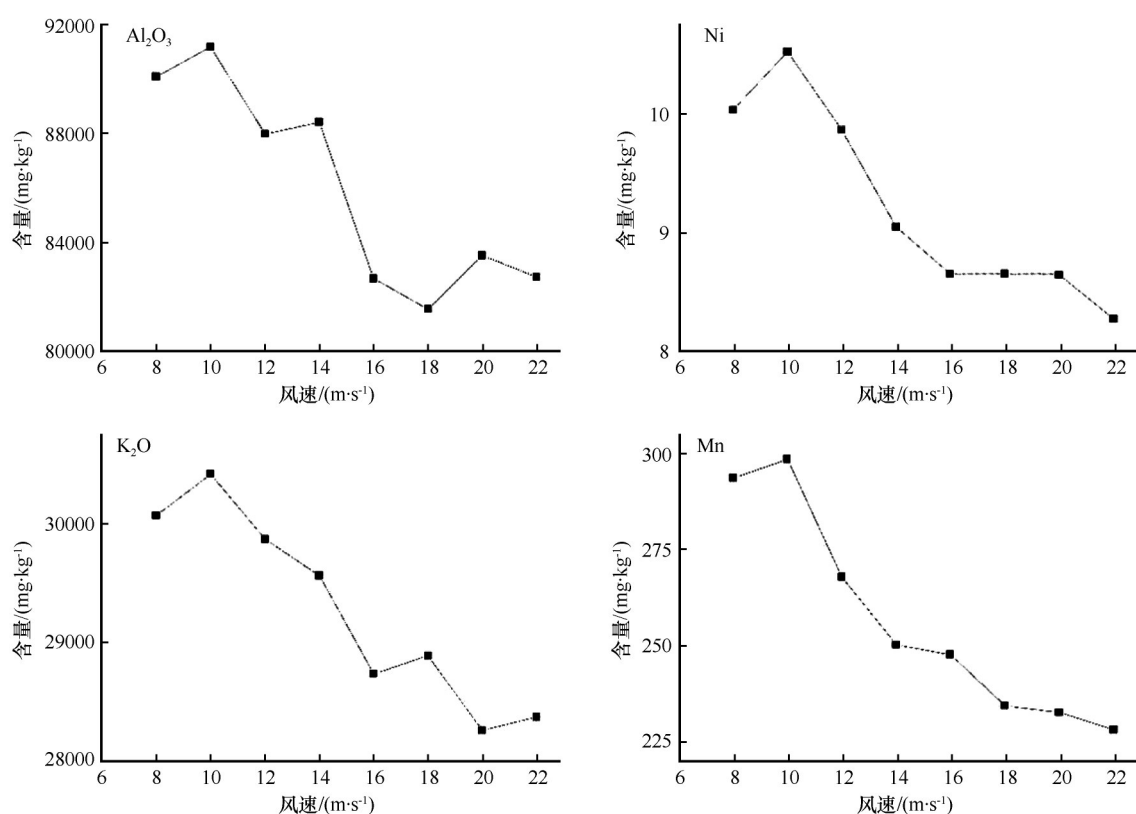


图7 风蚀物元素含量与风速关系(III)

Fig.7 The relationship of wind velocity and elements contents of transported material (III)

表 4 浑善达克沙地风蚀物粒径与元素含量相关关系

Table 4 The correlation coefficient between grain size and elements in wind blow sediment of the Otindag Sand Land

元素	黏土 <2 μm	粉沙 2~63 μm	极细沙 63~125 μm	细沙 125~250 μm	中沙 250~500 μm	粗沙 500~1 000 μm
Al ₂ O ₃	0.426**	-0.131**	0.398**	-0.084	-0.461**	-0.182*
CaO	0.479**	0.067**	0.031	-0.339**	-0.038	-0.091
Fe ₂ O ₃	0.824**	0.316**	0.486**	-0.607**	-0.499**	0.157
K ₂ O	-0.250**	-0.644**	0.230**	0.665**	-0.420**	-0.194*
MgO	0.810**	0.175**	0.284**	-0.571**	-0.277**	-0.064
Na ₂ O	-0.042	-0.197*	0.164*	0.198*	-0.190*	-0.013
Cu	0.168*	-0.090	0.159	0.009	-0.192*	0.047
Zn	0.284**	-0.057**	0.210**	-0.104	-0.217**	0.048
Ti	0.864**	0.352**	0.457**	-0.666**	-0.462**	0.126
Lu	0.774**	0.360**	0.453**	-0.633**	-0.425**	0.075
Ba	-0.336**	-0.658**	-0.140	0.645**	0.010	-0.306**
Cr	0.414**	0.141**	0.128	-0.328**	-0.128	-0.010
Li	0.708**	0.267**	0.375**	-0.534**	-0.363**	0.122
Mn	0.835**	0.341**	0.370**	-0.655**	-0.379**	0.094
Ni	0.878**	0.301**	0.532**	-0.651**	-0.512**	0.094
P	0.256**	0.062*	0.288**	-0.130	-0.316**	0.192*
Pb	0.336**	0.079**	0.321**	-0.233**	-0.231**	0.014
Sc	0.757**	0.295**	0.395**	-0.599**	-0.366**	0.066
Sr	0.145	-0.375**	0.017	0.184*	-0.100	-0.268**
V	0.876**	0.267**	0.474**	-0.632**	-0.462**	0.049
Ag	0.573**	0.124**	0.332**	-0.381**	-0.320**	0.042
Cd	0.615**	0.223**	0.276**	-0.466**	-0.260**	0.064
Ga	-0.113	-0.560**	0.123	0.505**	-0.269**	-0.186*
Gd	0.802**	0.331**	0.393**	-0.633**	-0.389**	0.046
As	0.049	-0.218**	0.048	0.127	-0.098	0.032
S	0.020	0.008	0.026	0.020	-0.057	0.117
Co	0.878**	0.300**	0.522**	-0.648**	-0.494**	0.063
Tl	0.113	-0.210**	0.460**	0.104	-0.478**	-0.128
Cs	0.334**	0.183**	0.219**	-0.278**	-0.229**	0.127
In	0.828**	0.275**	0.499**	-0.610**	-0.481**	0.097
Rb	0.070	-0.420**	0.415**	0.337**	-0.569**	-0.149
U	0.808**	0.363**	0.493**	-0.658**	-0.473**	0.094
Bi	0.766**	0.340**	0.453**	-0.611**	-0.401**	0.117
Mo	0.076	-0.045	0.226**	-0.015	-0.175*	-0.020
Be	0.661**	0.047**	0.625**	-0.311**	-0.669**	0.041
Y	0.775**	0.396**	0.429**	-0.653**	-0.415**	0.107

续表4

元素	黏土 <2 μm	粉沙 2~63 μm	极细沙 63~125 μm	细沙 125~250 μm	中沙 250~500 μm	粗沙 500~1 000 μm
La	0.752**	0.256**	0.393**	-0.547**	-0.407**	0.032
Ce	0.772**	0.258**	0.433**	-0.571**	-0.412**	0.019
Pr	0.730**	0.217**	0.293**	-0.537**	-0.305**	-0.025
Nd	0.772**	0.334**	0.359**	-0.631**	-0.350**	0.038
Sm	0.783**	0.284**	0.414**	-0.590**	-0.417**	0.033
Eu	0.698**	0.042**	0.508**	-0.363**	-0.540**	-0.048
Tb	0.772**	0.326**	0.464**	-0.598**	-0.458**	0.084
Dy	0.808**	0.359**	0.420**	-0.657**	-0.408**	0.062
Ho	0.803**	0.345**	0.465**	-0.638**	-0.446**	0.082
Er	0.754**	0.334**	0.417**	-0.608**	-0.384**	0.063
Tm	0.776**	0.414**	0.417**	-0.687**	-0.366**	0.078
Yb	0.630**	0.451**	0.321**	-0.615**	-0.280**	0.119

注:表中数值为相关系数,*表示0.05显著性水平,**表示0.01显著性水平。

整体而言,大部分元素都与风蚀物中<125 μm的部分极显著正相关,而与125~500 μm的部分极显著负相关。个别元素如K₂O和Ba则刚好相反,与<63 μm的部分极显著负相关,而与125~250 μm的组分(细沙)极显著正相关。

3 结论

浑善达克沙地土壤风蚀率(q)与风速(V)呈指数关系,拟合方程为 $q=0.15 \times 1.23^V$ ($R^2=0.97$)。中沙和细沙最易被风蚀,而粉沙则属于较难蚀颗粒,粗沙的启动风速大于 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风蚀物的粒度分布模式基本一致且皆为单峰。随着风速增加,风蚀物峰值处粒度含量逐渐下降,土壤表层粒度变粗。不同风速下风蚀物的平均粒径 $2.46 \sim 2.58 \Phi$,风速为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时风蚀物平均粒径最细;各风速下的风蚀物分选较差,为极度正偏,风蚀物的峰态皆为非常宽。

风蚀物的元素含量超过1%的主要有Al、Ca、Fe、Na、K、Mg、Ti等元素,这些元素为土壤中的大量元素,K₂O在不同风速下风蚀物中的含量变异性最小,Mo元素变异性最大。随着风速增加,风蚀物中元素含量主要以3种模式发生变化,分别是连续下降型、“W”下降型和先升后降型。

风蚀物中大部分元素含量都与风蚀物中<125 μm部分极显著正相关,而与125~500 μm部分极显著负相关。K₂O和Ba则刚好相反,与<63 μm部分极显

著负相关,而与125~250 μm部分极显著正相关。

未来需要结合地质学、地球化学、环境科学等多学科领域的知识和方法,进一步深入研究土壤粒度和元素分异特征之间的相互关系及响应机理,为制定更加科学有效的环境保护和治理措施提供依据。

参考文献:

- [1] Martz L W, Li L. Grain-size analysis of surface material under wind erosion using the effective surface concept[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22(1): 19–29.
- [2] Zhu B Q, Yu J J. Aeolian sorting processes in the Ejina desert basin (China) and their response to depositional environment [J]. *Aeolian Research*, 2014, 12: 111–120.
- [3] Wang X M, Lang L L, Hua T, et al. The effects of sorting by aeolian processes on the geochemical characteristics of surface materials: a wind tunnel experiment[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2017, 12(4): 1–9.
- [4] Ravi S, Breshears D, Huxman T, et al. Land degradation in drylands: interactions among hydrologic-aeolian erosion and vegetation dynamics[J]. *Geomorphology*, 2010, 116(3/4): 236–245.
- [5] 章明奎. 砂质土壤不同粒径颗粒中有机碳、养分和重金属状况[J]. *土壤学报*, 2006(4): 584–591.
- [6] 胡慧, 包维楷, 张强, 等. 土壤石砾含量变化对根系及植物生长的影响研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(2): 303–308.
- [7] Li T, Li Y G, Liu H, et al. Chemical weathering intensity and geochemical characteristics of *Cretaceous terrigenous* clastic rock-purple soil profiles in the Pushi area, Xichang[J]. *Geological Journal*, 2022, 57(9): 3587–3600.

- [8] Kunz B E, Warren C J, Jenner F E, et al. Critical metal enrichment in crustal melts: the role of metamorphic mica[J]. *Geology*, 2022, 50(11): 1219–1223.
- [9] Chen S, Wu C C, Hong S S, et al. Assessment, distribution and regional geochemical baseline of heavy metals in soils of densely populated area: a case study[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(7): 1–10.
- [10] 傅伯杰, 郭旭东, 陈利顶, 等. 土地利用变化与土壤养分的变化: 以河北省遵化县为例[J]. *生态学报*, 2001, 21(6): 926–931.
- [11] 张春来, 宋长青, 王振亭, 等. 土壤风蚀过程研究回顾与展望[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(1): 27–41.
- [12] Webb N P, McCord S E, Edwards B L, et al. Vegetation canopy gap size and height: critical indicators for wind erosion monitoring and management[J]. *Rangeland Ecology & Management*, 2021, 76(1): 78–83.
- [13] Wang X M, Geng X, Liu B, et al. Desert ecosystems in China: past, present, and future[J]. *Earth-science Reviews*, 2022, 234: 1–11.
- [14] 孟惠聪, 胡光印, 董治宝, 等. 若尔盖盆地流动沙丘治理前后表层沉积物粒度变化特征[J]. *中国沙漠*, 2024, 44(3): 1–12.
- [15] Larney F J, Bullock M S, Janzen H H, et al. Wind erosion effects on nutrient redistribution and soil productivity[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1998, 53(2): 133–140.
- [16] Visser S M, Sterk G. Nutrient dynamics-wind and water erosion at the village scale in the Sahel[J]. *Land Degradation & Development*, 2010, 18: 1–9.
- [17] 渠洪杰, 陈英富, 卢晶, 等. 浑善达克沙地最近一次大规模沙化的沉积记录及其光释光年龄[J]. *中国地质*, 2022, 49(3): 1003–1004.
- [18] 赵媛媛, 武海岩, 丁国栋, 等. 浑善达克沙地土地沙漠化研究进展[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(5): 101–111.
- [19] 李庆, 周娜, 王盛, 等. 气候变化和人类活动对土壤风蚀影响的定量评估: 以内蒙古自治区为例[J]. *中国沙漠*, 2024, 44(1): 178–188.
- [20] 罗晶, 黄晓霞, 程宏, 等. 浑善达克沙地景观结构变化对生态系统服务的影响[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(4): 99–109.
- [21] 齐丹卉, 杨洪晓, 卢琦, 等. 浑善达克沙地植物群落主要类型与特征[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 23–33.
- [22] 朱震达, 刘恕. 中国沙漠化土地的特征及其防治的途径[J]. *自然资源*, 1980(3): 25–37.
- [23] Li D F, Wang X M, Lou J P, et al. Heterogeneity and loss of soil nutrient elements under aeolian processes in the Otindag Desert, China[J]. *Aeolian Research*, 2018, 30: 48–53.
- [24] Wang X M, Lou J P, Ma W Y, et al. The impact of reclamation on aeolian desertification of four species in the Otindag Desert, China[J]. *Catena*, 2017, 157: 189–194.
- [25] Blott S J, Pye K. Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(11): 1237–1248.
- [26] 贾建军, 高抒, 薛允传. 图解法与矩法沉积物粒度参数的对比[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(6): 577–582.
- [27] Wang X M, Dong Z B, Yan P, et al. Wind energy environments and dunefield activity in the Chinese deserts[J]. *Geomorphology*, 2005, 65(1/2): 33–48.
- [28] 董治宝, 陈渭南, 董光荣, 等. 关于人为地表结构破损与土壤风蚀关系的定量研究[J]. *科学通报*, 1995(1): 54–57.
- [29] Houser C A, Nickling W G. The emission and vertical flux of particulate matter <10 μm from a disturbed clay-crust surface[J]. *Sedimentology*, 2010, 48(2): 255–267.
- [30] Gillette D A, Stockton P H. The effect of nonerodible particles on wind erosion of erodible surfaces[J]. *Journal of Geophysical Research-atmospheres*, 1989, 94(10): 12885–12893.
- [31] Gillette D A, Chen W N. Size distributions of saltating grains: an important variable in the production of suspended particles[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24(5): 449–462.
- [32] 宗月香. 浑善达克沙地气候因子与土壤质地相关性初探[J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2003(3): 334–337.
- [33] 刘树林, 王涛. 浑善达克沙地的土地沙漠化过程研究[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(5): 719–724.
- [34] Chepil W S. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: IV. sand, silt, and clay[J]. *Soil Science*, 1955, 80: 1–13.
- [35] 卢连战, 史正涛. 沉积物粒度参数内涵及计算方法的解析[J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(6): 54–60.
- [36] Bundschuh M, Mckie B G. An ecological and ecotoxicological perspective on fine particulate organic matter in streams[J]. *Freshwater Biology*, 2016, 61(12): 2063–2074.

Grain size and element differentiation during aeolian processes in Otindag Sandy Land

Lou Junpeng^{1,2}, Cai Diwen^{2,3}, Ma Wenyong^{2,4}, Jiao Linlin²

(1. Chinalco Environmental Protection and Energy Conservation Group Co., Ltd, Beijing 102209, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. School of Geographical Sciences, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, Guangdong, China; 4. Key Laboratory of Digital Earth Sciences, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to explore the differentiation and relationship between soil particle size and chemical elements during aeolian processes in Otindag Sandy Land, and to provide data and theoretical support for ecological governance and vegetation restoration in arid areas, this study analyzed the characteristics of grain size gradation, grain size distribution frequency curve and grain size parameters of wind eroded sediment at different wind speeds, as well as the changes of elemental content of wind eroded sediment through wind tunnel tests. The results show that the relationship between soil wind erosion rate and wind speed follows an exponential law, and the particle size distribution of wind eroded sediment is unimodal. The average particle size of wind eroded sediment at different wind speeds is between 2.46Φ and 2.58Φ , and the sorting of the sediment is extremely positive, and the peak state is very wide as well. The changes of elemental content in wind eroded sediment with wind speed mainly include three types, namely, continuous decrease type, "W" decrease type, and rise-and-fall type. Most of the elemental content has a significant positive correlation with the $<125 \mu\text{m}$ portion of wind eroded sediment, and a significant negative correlation with the $125\text{--}500 \mu\text{m}$ portion.

Key words: wind tunnel tests; chemical elements; particle size; differentiation feature; Otindag Sand Land