

肖雨婷,张国明,洪畅,等.巴丹吉林沙漠西缘不同地表沙尘水平通量[J].中国沙漠,2023,43(2):104–113.

巴丹吉林沙漠西缘不同地表沙尘水平通量

肖雨婷^{1abc},张国明^{1abd,2},洪畅^{1abc},刘连友^{1abc},杨岩岩³,谷雨^{1abc},
刘勇^{1abc},向明珠^{1abc},曲书锋^{1abc},孙煦然^{1abc}

(1.北京师范大学 a.环境演变与自然灾害教育部重点实验室, b.防沙治沙教育部工程研究中心, c.地理科学学部,
d.国家安全与应急管理学院,北京 100875; 2.中国科学院西北生态环境资源研究院 中国科学院沙漠与沙漠化重
点实验室,甘肃 兰州 730000; 3.中国林业科学研究院 生态保护与修复研究所,北京 100091)

摘要:巴丹吉林沙漠西缘是黑河中下游冲洪积平原地表风沙输入沙漠内部的重要断面。在沙漠西缘选择干涸湖床、芦苇滩地、盐碱滩地、流动沙地、灌丛沙堆5种典型地表,利用MWAC沙尘收集器,开展近地表沙尘输移通量的野外观测,分析不同高度(10、25、50、85 cm)沙尘水平通量及分布特征,计算观测期间不同地表沙尘水平通量。结果表明:不同地表沙尘水平通量随高度增加而减小,与高度呈指数型函数关系。0~85 cm高度的5种典型地表沙尘水平通量存在明显差异,流动沙地>干涸湖床>芦苇滩地>盐碱滩地>灌丛沙堆,0~10 cm高度层内沙尘通量占比最大。流动沙地和干涸湖床为巴丹吉林沙漠西缘主要输沙地表。植被覆盖度、裸露空间面积以及地表物质层特性,直接影响地表沙尘的输送通量。风速会影响沙尘水平通量分布,较大风速的地表风蚀起沙的粒径较大,地表沙尘水平通量也较大。研究结果有助于了解沙漠西缘输沙断面不同地表的沙尘输移规律与区域风沙过程。

关键词:巴丹吉林沙漠; 沙尘; 水平通量; 分布特征

文章编号: 1000-694X(2023)02-104-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00110

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

巴丹吉林沙漠西缘是巴丹吉林沙漠与黑河流域中下游冲洪积平原的分界线,也是巴丹吉林沙漠内部风沙输入的重要断面。巴丹吉林沙漠的沙源主要为西部面积广大的洪积平原和西北部的湖积平原地表沉积物^[1-4],研究区西北部阿尔泰山东缘、青藏高原东北缘的祁连山及阿拉善高原为沙漠提供了大量的潜在物源^[5]。巴丹吉林沙漠西缘地表类型多样,主要是以湖相沉积为基底的风蚀地貌,由大面积流动沙丘、灌丛沙堆、砾石戈壁、绿洲以及绿洲退化地表组成,有白刺、泡泡刺、红砂、红柳等旱生植物。地表粗糙度影响大气与地表间能量的传输,也影响地表风沙输移过程,区内地表风蚀存在明显的空间差异。

风沙流结构是风沙研究的重要内容,指单位时间、单位面积水平输沙通量随高度的分布及变化规律^[6],反映不同轨迹运动的沙粒在垂直方向上的运移特征^[7]。风沙流观测中,沙尘通量是反映地表风蚀状况和风沙地貌形成的基础^[8]。沙尘水平通量是与风蚀有关的地表沉积物输移的指标^[9],沙尘在近地表的沉降通量与不同高度沙尘水平通量紧密相关^[10],研究方法主要包括野外长期观测、风洞实验、实验数值分析等。此外,许多研究已经尝试使用小型机械风洞(PI-SWERL,便携式风洞)或其他替代设备来探索影响地表风蚀的因素^[11],例如风速或摩擦速度^[12-13]。然而,关于沙尘的建模和预测仍然存在一定限制^[14-15],这与野外对风成驱动过程中沙尘的释放、运输和沉积的准确观测缺乏有关。风蚀模型的校准,也需要风蚀水平(跃移)沙尘通量和频率

收稿日期:2022-05-04; 改回日期:2022-09-05

资助项目:国家自然科学基金项目(41971120,41730639);中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室开放课题(KLDD-2020-002);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0906)

作者简介:肖雨婷(1998—),女,四川宜宾人,硕士研究生,研究方向为干旱区地表风蚀过程与粉尘排放。

E-mail: 202021051169@mail.bnu.edu.cn

通信作者:张国明(E-mail: zgm@bnu.edu.cn)

的测量。风洞试验研究与野外观测表明,沙尘水平通量随高度的变化大致呈指数或幂函数规律^[16-17];沙漠地表沙尘水平通量随着高度的增加而增加,但在32 m以上高度几乎不变^[18];戈壁地表输沙存在“象鼻效应”,最大输沙量不是在近地面而是在距地表5~6 cm高度^[19-20]。杨帆等^[21]对巴丹吉林沙漠北缘沙尘天气过程中气象要素的变化特征进行分析,发现观测期间0~100 cm内总输沙量的50%和90%分别集中在地表20 cm和56 cm高度以内。这些结果有益于沙尘模型的改进。野外实测沙尘水平通量特征主要受地表风速、植被或砾石覆盖度等因素影响^[22-24]。郭树江等^[25]对青土湖的干涸湖床不同地表风沙流结构的观测表明,不同区域下垫面起伏高度、植被盖度等对沙尘输移通量影响较大。地形地貌、植被及动力等因素的变化,也会影响地区内沙尘输送通量的结构特征改变^[26]。

当前针对巴丹吉林沙漠的研究大多关注其风速^[27-28]、植被特征^[29-31]、湖泊沉积环境^[32-34]等。关于沙漠西缘不同地表的风沙活动特征研究还较少,针对野外多种地表间输沙量的定期观测数据比较缺

乏。野外输沙通量测量数据是风蚀模型开发和校验的重要支撑,对野外沙尘水平质量通量计算有着重要意义。深入了解巴丹吉林沙漠西缘不同地表沙尘水平通量特征与分布规律,对进一步认识沙漠西缘的输沙与沙尘释放,判定上风向主要沙尘物源,探究区域内部风沙活动规律具有重要意义。

1 研究区概况

巴丹吉林沙漠位于中国内蒙古西部阿拉善高原,地域范围39°04′15″—42°12′23″N、99°23′18″—104°34′02″E,面积52 162 km²,是中国第二大沙漠^[35]。研究区位于黑河下游冲洪积平原与巴丹吉林沙漠交界处的沙漠西缘(图1),属典型内陆温带荒漠气候,降水稀少,气候干燥。巴丹吉林沙漠淡水表面平均年蒸发量为1 000 mm,沙丘表面平均年蒸发量为100 mm^[36]。区域内部年均风速4 m·s⁻¹,冬春季主导风向为WN,其他月份主导风向为W,极易出现沙尘暴^[37]。剥蚀丘陵、风蚀洼地、灌丛沙堆、干涸盐湖、流动沙地、盐碱滩地、芦苇滩地为研究区内典型地表类型,地表环境极为复杂。

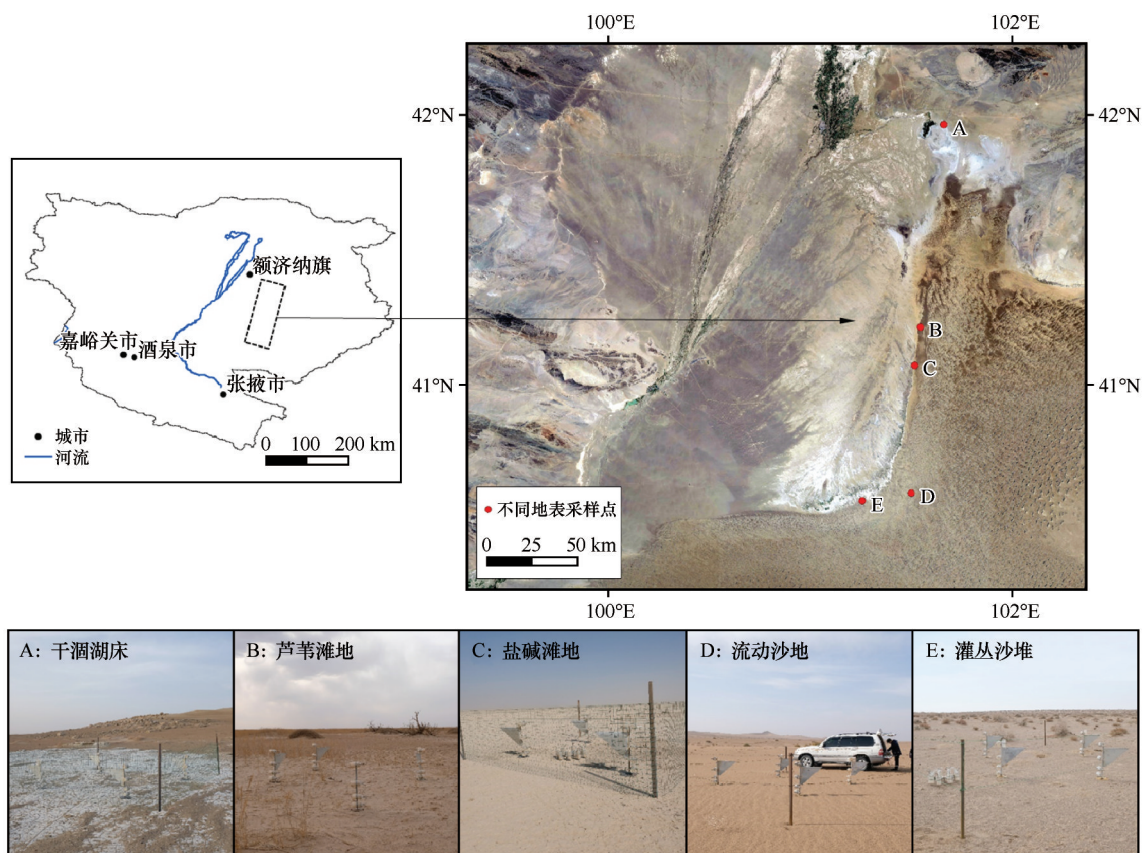


图1 研究区概况图

Fig. 1 The location of the western edge of the Badain Jaran Desert

2 研究方法

2.1 MWAC近地表沙尘收集器

目前常见的地表跃移颗粒物收集的仪器主要有 Big Spring Number Eight (BSNE) 集沙仪、New Flat Opening Collector (NFOC) 集沙仪以及 Modified Wilson and Cook (MWAC) 集沙仪^[38-39]。本研究使用的 MWAC 近地表沙尘收集器在原有基础上进行了改良,通过在 MWAC 近地表沙尘收集器圆柱形桅杆顶部增加旋转钢珠减小机械转动摩擦,提高了收集灵敏性。为更好适应野外采集工作,收集器采用 1 800 mL 容积 PET 罐,装配了管状进沙口和出风口,口径为 1.30 cm,进沙口管略短,出气口管稍长,可明显减缓进沙气流阻塞,有利沙尘进入沉积罐。每个 MWAC 近地表沙尘收集器附有高度 1 m 桅杆,每个桅杆安装 4 个沉积罐,高度为距地面 10、25、50、

85 cm。桅杆主轴附加三角形风向标,长 0.60 m,宽 0.40 cm,随风转动以控制方向。

2.2 仪器布设与样品收集

不同地表观测样地布设于巴丹吉林沙漠西缘(图 1),试验期从 2019 年 2 月 20 日至 2020 年 7 月 10 日。每样地由 9 个 MWAC 近地表沙尘收集器组成,按照 3×3 规格排列,每两个 MWAC 近地表粉尘收集器间隔 3 m,确保 MWAC 的尾翼随风摆动时不受影响(图 2)。研究期内共进行了 3 次采样,时间分别为 2019 年 7 月 23 日、12 月 27 日和 2020 年 7 月 10 日。所收集沙尘样品及时装入塑料自封袋后带回北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室进行分析。同时利用现场布设的观测高度为 2 m 的气象站风速资料分析了 2019 年 1 月 1 日至 12 月 31 日内的沙尘天气状况。



图2 MWAC近地表沙尘收集器

Fig. 2 Aeolian sand-dust was sampled using custom-made MWAC (Modified Wilson and Cooke) sediment samplers

2.3 沙尘水平通量计算

收集 4 个高度 MWAC 沙尘样品,分别装入已称量的空样品袋中称重。将采样器中收集沙尘净质量除以收集时间间隔,结合 MWAC 采样器入口面积计算出单位时间内沙尘水平通量 $q(z)$ 。沙尘水平通量是风成沉积物再分配的主要贡献者,随高度迅速减小,1 m 处的通量占总通量的比例通常小于 10%^[40]。

$$q(z) = \frac{m}{t\Delta s} \quad (1)$$

式中: z 是地面到沉积物采样器入口中心高度; m 为 MWAC 所收集沙尘净质量; t 是收集时间间隔(d); Δs 为改良后 MWAC 入口面积($1.33 \times 10^{-4} \text{ m}^2$)。用 Shao 等^[41]开发经验公式拟合 $q(z)$ 值:

$$q(z) = ae^{cz^2 + bz} \quad (2)$$

式中: a 、 b 和 c 为拟合系数。通过对地面到 1 m 高度的 $Q(z)$ 积分,计算总沙尘水平通量 $Q(\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ ^[42-43]:

$$Q = \int_0^1 q(z) dz \quad (3)$$

利用单因素方差分析(One-Way ANOVA)检验沙漠西缘不同地表沙尘水平通量差异的显著性,所有统计分析均在 SPSS19.0 完成。利用 Origin2021 和 ArcGIS10.5 软件绘制图表和研究区概况图。

3 结果与分析

3.1 不同地表沙尘水平通量的垂直分布特征

巴丹吉林沙漠西缘 5 种典型地表输沙量随高度

升高而逐渐减小,不同地表0~85 cm高度层内输沙量分布有差异。5种下垫面0~10 cm高度层内输沙量占比最大,10~25 cm高度层内的输沙量占比次之,25~50 cm与50~85 cm高度层内输沙量占比较小且占比接近(图3)。芦苇滩地地表0~10 cm高度层输沙量占比约72%,10~25 cm高度层占比约18%,25~50 cm与50~85 cm高度层占比分别为6%和4%(图3A);干涸湖床地表0~10 cm高度层输沙量占比约55%,10~25 cm高度层占比约32%,25~50 cm与50~85 cm高度层占比分别为10%和3%(图3B);盐碱滩地地表0~10 cm高度层输沙量占比约64%,10~25 cm高度层占比约19%,25~50 cm与50~85 cm高度层占比分别为9%和5%(图3C);流动沙地地表0~10 cm高度层输沙量占比约50%,10~25 cm高度层占比约40%,25~50 cm与50~85 cm高度层占比分别为2%和1%(图3D);灌丛沙堆地表0~10 cm高度层输沙量占比约57%,10~25 cm高度层占比约24%,25~50 cm与50~85 cm高度层占比分别为12%和7%(图3E)。

地0~10 cm高度层输沙量占比约68%,10~25 cm高度层占比约20%,25~50 cm与50~85 cm高度层占比分别为7%和4%(图3C);流动沙地地表0~10 cm高度层输沙量占比约54%,10~25 cm高度层占比约39%,25~50 cm与50~85 cm高度层占比分别为7%和1%(图3D);灌丛沙堆地表0~10 cm高度层输沙量占比约57%,10~25 cm高度层占比约26%,25~50 cm与50~85 cm高度层占比分别为11%和6%(图3E)。

0~85 cm高度沙尘水平通量在干涸湖床、芦苇滩地、盐碱滩地、流动沙地、灌丛沙堆5种典型地表

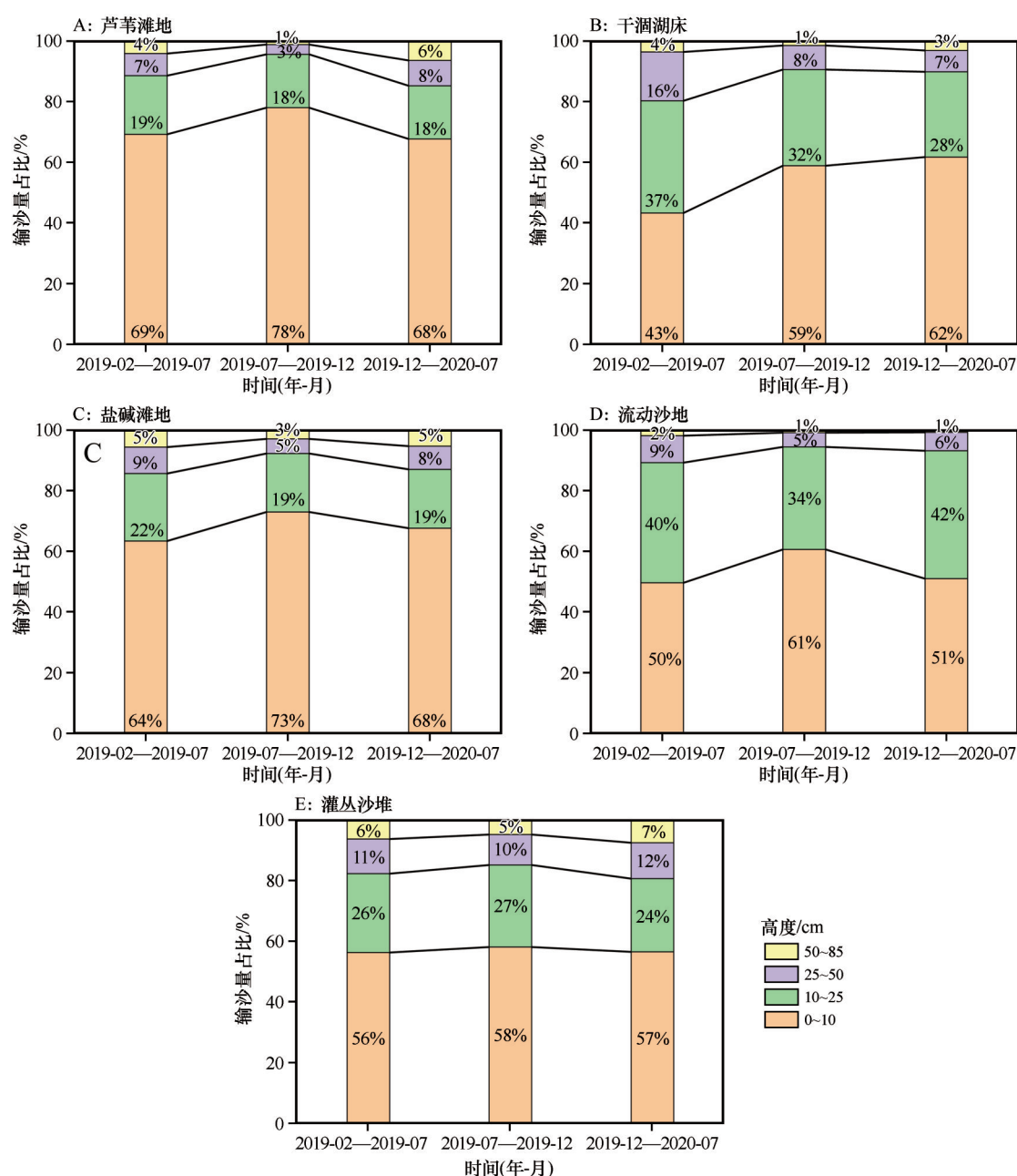


图3 不同地表不同高度输沙量占比

Fig. 3 Percentage of dust at different heights over different surface

随高度分布符合指数型函数分布规律,拟合函数的基本形式如图 4 所示。表 1 给出了不同地表沙尘水平通量随高度分布的函数拟合系数 a 、 b 、 c 及拟合优度 R^2 ,表征了不同观测时期沙尘天气过程沙尘水平通量的变化特点。其中, c 的绝对值 1.38~16.22,最

大值和最小值分别出现在流动沙地和干涸湖床地表; b 的绝对值 0.44~12.49,最大值和最小值分别出现在芦苇滩地和流动沙地地表; a 的绝对值 714.96~82 441.94,最大值和最小值分别出现在干涸湖床和灌丛沙堆地表。

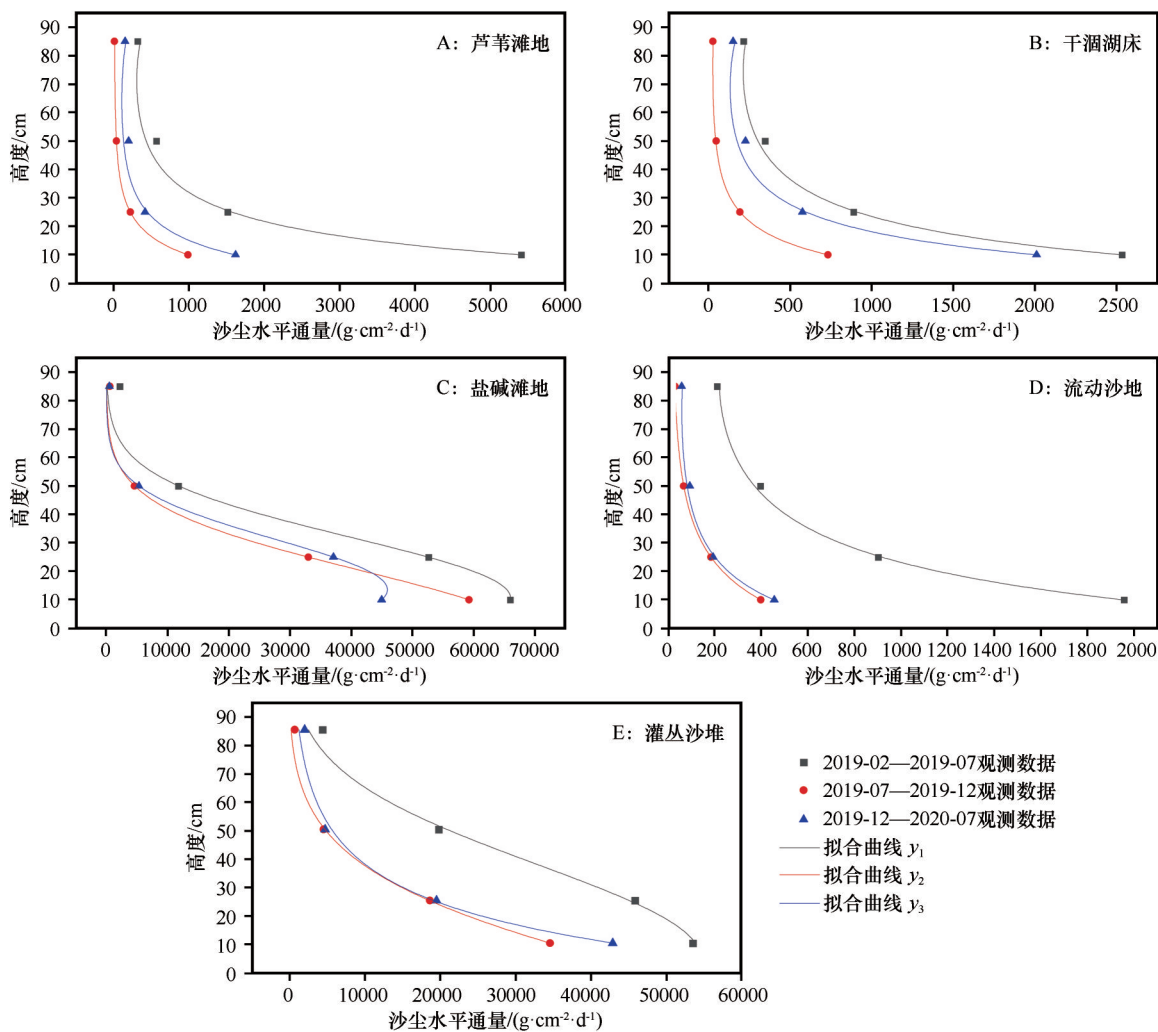


图 4 不同地表高度沙尘水平通量

Fig. 4 Total horizontal sand-dust flux of different heights over different surface

表 1 不同地表沙尘水平通量随高度分布的函数拟合系数

地表类型	2019-02—2019-07				2019-07—2019-12				2019-12—2020-07			
	y_1				y_2				y_3			
	c	b	a	R^2	c	b	a	R^2	c	b	a	R^2
芦苇滩地	7.66	-10.90	14 887.09	0.9958	7.36	-12.49	3 208.11	0.9999	9.13	-11.71	4 757.25	0.9885
干涸湖床	-4.70	0.46	58 240.00	0.9898	-3.14	-3.03	52 352.60	0.9988	1.38	-5.86	82 441.94	0.9956
盐碱滩地	5.98	-8.89	5 798.77	0.9976	7.53	-11.48	2 141.38	0.9999	7.85	-10.80	5 465.93	0.9955
流动沙地	-11.12	2.38	58 131.80	0.9956	-9.88	-0.44	68 364.59	0.9996	-16.22	4.39	34 085.22	0.9995
灌丛沙堆	3.54	-6.26	3 526.89	0.9986	2.87	-6.10	714.96	0.9999	4.59	-6.99	875.65	0.9934

3.2 不同地表总沙尘水平通量

0~1 m高度不同地表所收集的总沙尘水平通量(Q)排序为流动沙地($19\,301.81 \pm 4\,474.64\text{ g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) > 干涸湖床($18\,166.55 \pm 7\,680.41\text{ g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) > 芦苇滩地($874.21 \pm 784.64\text{ g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) > 盐碱滩地($592.19 \pm 330.61\text{ g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) > 灌丛沙堆($354.42 \pm 336.75\text{ g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)。其中干涸湖床与流动沙地地表平均总沙尘水平通量远大于其余3种地表,总沙尘水平通量最大地表(流动沙地)与最小地表(灌丛沙堆)相差约51倍。单因素方差分析结果表明,5种地表总体均值显著不同(图5)。各地表在年内不同季节水平输沙通量存在较大差异,观测结果显示,流动沙地和干涸湖床为巴丹吉林沙漠西缘主要的输沙地表。

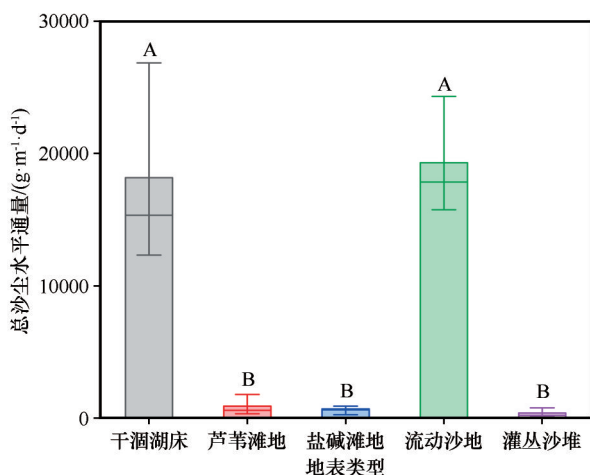


图5 不同地表平均总沙尘水平通量(2019-02—2020-07, 用不同大写字母表示差异显著, $P < 0.01$)

Fig. 5 The derived total horizontal sand-dust flux from MWAC sediment samplers in different areas show an average from February of 2019 to July of 2020 (Significant difference is denoted by the A and B symbols, $P < 0.01$)

4 讨论

4.1 沙尘水平通量分布特征地表差异性

下垫面性质会通过影响携沙气流能量的分布而影响物理学特性相同沙粒的风沙流结构^[44]。下垫面类型会对沙粒起动风速、跃移高度、能量衰减产生影响^[45]。低风能环境中沙尘输移集中在30 cm以下^[46],地表输沙率、沙尘通量与高度呈负幂函数关系^[25],毛乌素沙地的平坦流沙地表^[47]、塔里木盆地沙漠-绿洲过渡带^[48]的沙尘通量也存在相似规

律。本文针对巴丹吉林沙漠西缘5种地表沙尘水平通量的观测结果表明,不同地表输沙量0~85 cm高度层内呈指数型函数趋势,这与王自龙等^[45]对平坦沙地和流动沙地下垫面输沙量观测到的0~30 cm高度层所呈现的指数曲线变化规律相近。巴丹吉林沙漠北缘沙尘天气过程中,拐子湖地表0~20 cm高度左右的输沙通量具有明显分段现象,20 cm高度层内随着地表高度的增加,各高度输沙率百分比、含沙浓度、运动颗粒能量呈波动增大趋势。野外监测实验中自由风和风沙流廓线拟合呈现指数型函数分布^[49],与本研究地表0~85 cm高度层内沙尘水平通量变化特征一致。湖区地面20 cm高度以上,随高度增加输沙率百分比变小^[50],100 cm内总输沙量的50%和90%分别集中在地表20 cm和56 cm高度以内^[21],与本研究5种典型地表0~10 cm高度层内输沙量(54%~72%)占比最大的规律相同。戈壁地表中风沙流结构“象鼻效应”^[19,51]在拐子湖垂直方向上出现,该规律巴丹吉林沙漠西缘5种典型地表间表现并不十分明显。这可能与MWAC仪器布设周期以及垂直方向上沉积罐排列密度有关。不同学者对风沙流拟合的指数型函数系数 a 、 b 、 c 有不同见解。部分学者认为拟合指数函数系数 a 代表风沙流浓度的最大值^[52]或是沙尘运动中蠕移物质的含量^[53],但是,在复杂的自然条件中,下垫面与气候环境的长期左右使得拟合系数 a 、 b 、 c 随风速和输沙率的关系而发生变化^[54],因此野外长期沙尘通量的观测与气象数据采集分析有助于进一步阐明沙漠西缘不同地表之间的风沙活动特征。

4.2 不同地表风蚀起沙成因

4.2.1 不同地表下垫面特征

风沙流输沙率与地表植被盖度间存在相关,通常地表植被会改变下垫面状况进而改变地表粗糙度和地表剪切力,导致风沙流结构的变异^[55-56]。植被覆盖度低或者空旷的裸露地表沙尘水平通量会有所增加^[57-59]。巴丹吉林沙漠西北部降水量小,蒸发量大,盐碱大面积覆盖,盐生、旱生植被广泛分布^[60],本试验中的芦苇滩地、盐碱滩地、灌丛沙堆地表水平沙尘通量显著小于干涸湖床与流动沙地。芦苇滩地与盐碱滩地地表分布有红砂、白刺、沙拐枣植株,这些沙漠地表植被会对地表沙粒有一定拦截作用^[61]。干涸湖床为沙漠西缘北部居延泽古湖床,地表龟裂板结,风蚀严重,仅生长有少量矮小沙

拐枣和白刺灌丛,植被覆盖率低,沙尘易被风力驱动输移。流动沙地地表毗邻巴丹吉林沙漠西侧,地势低平且植被覆盖极低,这为区域地表输沙提供了良好通道。相比之下,灌丛沙堆位于巴丹吉林沙漠西缘的古日乃湖南侧,区域存在浅层地下水,地表生长丰富白刺、芦苇等植被,而植被沙堆本身作为汇,可以捕获沙尘沉积物通量^[58]。灌丛沙堆地表多被白色盐碱结壳土壤和砂石覆盖,这些植被、地表物质层在一定程度上会起到稳定地表、阻截流沙的作用^[62]。

4.2.2 不同地表风况特征

风速是影响地表输沙量的主要因素^[63]。巴丹吉林沙漠西缘5种地表2019年平均风速存在差异。干涸湖床地表年平均风速 $3.60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,与流动沙地平均风速 $3.42\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 相近,均大于盐碱滩地的 $2.70\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、灌丛沙堆的 $2.56\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 与芦苇滩地的 $2.38\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。与文献中在巴丹吉林沙漠和邻近地区观测到的年均风速^[64]一致,即风能呈从东北、北向西南方向逐渐减少的规律,平均风速大小与5种典型地表的总沙尘水平通量差异性基本相似。平均风速的差异可能影响地表沙尘水平通量的分布。当平均风速较大时,地表风蚀起沙粒径较大,输沙通量也较大^[65]。在沙漠-绿洲过渡带中,平均风速较大时,流沙地、半固定沙地地表的输沙通量在0~20 cm的高度内表现为指数关系,且函数拟合程度优于平均风速较小的观测期^[66]。巴丹吉林沙漠内部起沙风速随区域而不同,沙漠北缘的拐子湖地区春季起沙风速约 $6.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[21],而沙漠腹地的大沙枣海子春季起沙风速仅约 $5.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[67],因此以风速 $\geq 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 作为巴丹吉林西缘5种地表起沙风进行统计。干涸湖床与流动沙地2种地表起沙风速频率远大于其余3种地表,这与不同地表监测的总沙尘水平通量结果一致。其中干涸湖床地表的起沙风频率(8.7%)大于流动沙地(3.4%),可能与干涸湖床地表地势低平、植被覆盖率低导致的风阻效应低有一定关系。

5 结论

巴丹吉林沙漠西缘5种地表沙尘水平通量均随着高度增加而减小,与高度呈指数函数关系。0~85 cm高度层内沙尘水平通量分布特征与不同地表输沙量存在明显差异。0~10 cm高度层内输沙量占比最大,且流动沙地>干涸湖床>芦苇滩地>盐碱滩地>灌丛沙堆,其中流动沙地和干涸湖床为巴丹吉

林沙漠西缘主要输沙地表类型。

近地表风况和下垫面的性质对各地表沙尘水平通量存在影响。下垫面植被覆盖度、裸露空间面积以及地表物质层特性,直接影响地表沙尘的输送通量。风速会影响沙尘水平通量分布,较大风速的地表风蚀起沙的粒径较大,地表沙尘水平通量也较大。因此沙漠西缘干涸湖床与流动沙地地表的平均风速和起沙风频率大于其他3种地表。

致谢:感谢北京师范大学地理科学学部风沙研究团队对野外试验工作的支持和帮助。

参考文献:

- [1] Yang X P. Geomorphologische untersuchungen in trockenrumen NW-Chinas unter besonderer berücksichtigung von Badanjinlin und Takelamagan[J]. Gottinger Geographische Abhandlungen, 1991, 96: 1-36.
- [2] 闫满存,王光谦,李保生,等.巴丹吉林沙漠高大沙山的形成发育研究[J].地理学报,2001,56(1):83-91.
- [3] Mischke S. New evidence for origin of Badain Jaran Desert of Inner Mongolia from granulometry and thermoluminescence dating[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(1): 79-97.
- [4] 宁凯,王乃昂,李卓仑,等.基于CMB模型的巴丹吉林沙漠沙源区分析[J].干旱区地理,2021,44(2):389-399.
- [5] Hu F G, Yang X P. Geochemical and geomorphological evidence for the provenance of aeolian deposits in the Badain Jaran Desert, northwestern China[J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 131: 179-192.
- [6] 武建军,何丽红,郑晓静.跃移层中沙粒浓度分布特征的研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2002,38(3):15-21.
- [7] 董治宝,孙宏义,赵爱国. WITSEG集沙仪:风洞用多路集沙仪[J].中国沙漠,2003,23(6):111-117.
- [8] 常兆丰,赵建林,刘世增,等.集沙仪开发研究现状、问题及突破点[J].生态学杂志,2018,37(9):2834-2839.
- [9] Breshears D D, Whicker J J, Johansen M P, et al. Wind and water erosion and transport in semi-arid shrubland, grassland and forest ecosystems: quantifying dominance of horizontal wind-driven transport[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 28(11): 1189-1209.
- [10] 康永德,杨兴华,肖让,等.基于精细化观测的沙尘通量分布特征[J].地球环境学报,2020,11(3):255-264.
- [11] Etyemezian V, Nikolich G, Ahonen S, et al. The Portable In Situ Wind Erosion Laboratory (PI-SWRL): a new method to measure PM_{10} windblown dust properties and potential for emissions[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(18): 3789-3796.
- [12] Baddock M C, Zobeck T M, Pelt R S V, et al. Dust emissions from undisturbed and disturbed, crusted playa surfaces: cattle trampling effects[J]. Aeolian Research, 2011, 3(1): 31-41.
- [13] Sankey J B, Germino M J, Glenn N F. Dust supply varies with

- sagebrush microsites and time since burning in experimental erosion events[J]. *Journal of Geophysical Research (Biogeosciences)*, 2012, 117: G01013.
- [14] Zhao Y, Huang A, Zhu X, et al. The impact of the winter North Atlantic Oscillation on the frequency of spring dust storms over Tarim Basin in northwest China in the past half-century[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(2): 24026.
- [15] Yang X H, Shen S H, Yang F, et al. Spatial and temporal variations of blowing dust events in the Taklimakan Desert[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 125: 669–677.
- [16] 黄雨晖, 韩小元, 赵健, 等. 新疆戈壁地区风沙流结构及其粒径特征研究[J]. *气象与减灾研究*, 2019, 42(3): 199–205.
- [17] 张克存, 屈建军, 俎瑞平, 等. 戈壁-流沙地表风沙流特性研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(10): 55–59.
- [18] Huo W, He Q, Yang F, et al. Observed particle sizes and fluxes of Aeolian sediment in the near surface layer during sand-dust storms in the Taklamakan Desert[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 130: 735–746.
- [19] 屈建军, 黄宁, 拓万全, 等. 戈壁风沙流结构特性及其意义[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 19–23.
- [20] 张克存, 屈建军, 俎瑞平, 等. 戈壁风沙流结构和风速廓线特征研究[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(1): 54–55.
- [21] 杨帆, 郑新倩, 努尔阿米娜·依明, 等. 巴丹吉林沙漠北缘沙尘天气过程中近地面气象要素变化及风沙流结构分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2015, 9(4): 67–74.
- [22] 刘旭阳, 宁文晓, 王振亭. 两种戈壁地表风沙流特征的野外观测[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(4): 1087–1094.
- [23] Farrell E J, Sherman D J, Ellis J T, et al. Vertical distribution of grain size for wind blown sand[J]. *Aeolian Research*, 2012, 7: 51–61.
- [24] 屈建军, 张克存, 张伟民, 等. 几种典型戈壁床面风沙流特性比较[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(2): 285–290.
- [25] 郭树江, 杨自辉, 王强强, 等. 青土湖干涸湖底风沙流结构及输沙粒径特征[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(4): 1166–1176.
- [26] 杨兴华, 何清, 程玉景, 等. 策勒绿洲-荒漠过渡带风沙前沿近地表沙尘水平通量观测[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(6): 1100–1105.
- [27] 韩菲. 中国北方沙漠鸣沙特征对比及其成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- [28] 何清, 胡文峰, 杨兴华, 等. 巴丹吉林沙漠拐子湖地区贴地层风速廓线和风沙流结构特征[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(3): 517–523.
- [29] 赵文智, 白雪莲, 刘婵. 巴丹吉林沙漠南缘的植物固沙问题[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(1): 5–11.
- [30] 刘鑫, 焦健, 王婷, 等. 巴丹吉林沙漠南缘沙地芦苇种群生态特征[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(1): 220–229.
- [31] 马瑞, 赵锦梅, 马彦军, 等. 巴丹吉林沙漠南缘近流沙区白刺灌丛沙堆形态特征与空间分布[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 217–221.
- [32] 何青华. 巴丹吉林沙漠湖泊沉积与泥炭层植硅体记录的全新世环境演变研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [33] 张律吕. 巴丹吉林沙漠全新世湖泊沉积记录及其演变机制探讨[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [34] 白旻, 王乃昂, 何瑞霞, 等. 巴丹吉林沙漠湖相沉积的探地雷达图像及光释光年代学证据[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(4): 842–847.
- [35] 朱金峰, 王乃昂, 陈红宝, 等. 基于遥感的巴丹吉林沙漠范围与面积分析[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(9): 1087–1094.
- [36] Yang X, Ma N, Dong J, et al. Recharge to the inter-dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, western China[J]. *Quaternary Research*, 2010, 73(1): 10–19.
- [37] 刘红梅, 吕世杰, 任倩楠, 等. 巴丹吉林沙漠梭梭林下沙质土壤的粒径变化和空间分布特征研究[J]. *草地学报*, 2021, 29(6): 1249–1256.
- [38] Fryrear D W. A field dust sampler[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1986, 41: 117–120.
- [39] Kirkby M J, Morgan R P C. *Soil Erosion*[M]. Chichester, USA: John Wiley & Sons, 1980: 217–251.
- [40] Li J, Okin G S, Alvarez L, et al. Quantitative effects of vegetation cover on wind erosion and soil nutrient loss in a desert grassland of southern New Mexico, USA[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85: 317–332.
- [41] Shao Y P, Raupach M R. The overshoot and equilibration of saltation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(20): 559–564.
- [42] Bhattachan A, D'Odorico P, Okin G S, et al. Potential dust emissions from the southern Kalahari's dunelands[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118: 307–314.
- [43] Dukes D, Gonzales H B, Ravi S, et al. Quantifying postfire aeolian sediment transport using rare earth element tracers[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(1): 288–299.
- [44] 张克存, 屈建军, 董治宝, 等. 风沙流中风速脉动对输沙量的影响[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(3): 336–340.
- [45] 王自龙, 赵明, 冯向东, 等. 民勤绿洲外围不同下垫面条件下风沙流结构的观测研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 72–75.
- [46] 王金国, 安志山, 张克存, 等. 乌玛高速公路中卫段风沙环境及输移规律[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(6): 183–189.
- [47] 吴晓旭, 邹学勇, 王仁德, 等. 毛乌素沙地不同下垫面的风沙运动特征[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(4): 828–835.
- [48] 邝华伟, 冯广龙. 塔里木盆地西北部3种典型下垫面风沙活动特征[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(2): 441–448.
- [49] 洛桑曲加, 张焱, 马鹏飞, 等. 雅鲁藏布江中游不同地表输沙量特征[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(2): 6–13.
- [50] 胡文峰. 巴丹吉林沙漠拐子湖地区春季风沙观测研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2012.
- [51] 鲁涛, 刘维, 徐玉波, 等. 台特玛湖干涸湖盆区风蚀起沙研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(11): 119–126.
- [52] 王洪涛, 董治宝, 张晓航. 风沙流中沙粒浓度分布的实验研究[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(5): 732–735.
- [53] Dong Z B, Lv P, Zhang Z C, et al. Aeolian transport over a developing transverse dune[J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(3): 243–254.

- [54] 陶彬彬, 哈斯额尔敦, 乌格特茉勒, 等. 库布齐沙漠南缘抛物线形沙丘表面风速与输沙率的变异[J]. 中国沙漠, 2015, 35(6): 1445-1452.
- [55] 李菁菁, 李得禄, 满多清, 等. 不同年代退耕地上 2 种积沙仪风沙流特征比较[J]. 中国农学通报, 2021, 37(8): 60-65.
- [56] 刘芳, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘地表风沙流结构特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1200-1207.
- [57] 管雪薇, 杨采怡, 刘广明, 等. 吉兰泰盐湖防护体系阻沙效应及输沙粒度特征[J]. 中国沙漠, 2022, 42(4): 50-59.
- [58] Field J P, Breshears D D, Whicker J J, et al. Sediment capture by vegetation patches: implications for desertification and increased resource redistribution[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, 117(1): G01033.
- [59] Okin G S, Gillette D A. Distribution of vegetation in wind-dominated landscapes: implications for wind erosion modeling and landscape processes[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001, 106(D9): 9673-9683.
- [60] 刘铮瑶, 董治宝, 王建博, 等. 巴丹吉林沙漠边缘地区植被特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(5): 1348-1356.
- [61] 崔徐甲, 董治宝, 逯军峰, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山区植被特征与地貌形态的关系[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 278-283.
- [62] 王兆云, 牛改红, 柳本立. 风沙活动强度 3 种估算指标对比及适用性分析[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 118-126.
- [63] 董玉祥, 马骏. 风速对海岸沙丘表面风沙流结构影响的实证研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(9): 179-183.
- [64] Zhang Z C, Dong Z B, Li C X. Wind regime and sand transport in China's Badain Jaran Desert[J]. *Aeolian Research*, 2015, 17: 1-13.
- [65] Liu X, Kang Y, Chen H, et al. Application of a high-precision aeolian sand collector in field wind and sand surveys[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(14): 7393.
- [66] 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[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 25-33.
- [67] 张克存, 奥迎焕, 屈建军, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊-沙山近地表风沙动力环境[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 790-794.

Sand-dust horizontal flux of different surfaces in the western margin of Badain Jaran Desert

Xiao Yuting^{labce}, Zhang Guoming^{labd,2}, Hong Chang^{labce}, Liu Lianyou^{labce}, Yang Yanyan³,

Gu Yu^{labce}, Liu Yong^{labce}, Xiang Mingzhu^{labce}, Qu Shufeng^{labce}, Sun Xuran^{labce}

(1.a.MOE Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disasters / b.MOE Engineering Research Center of Desertification and Blown-sand Control / c.Faculty of Geographical Science / d.School of National Safety and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2.Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3.Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The western margin of the Badain Jaran Desert is an important cross-section of sand transportation on the alluvial plain in the middle and lower reaches of the Heihe River. Five typical surfaces (playa, reed land, salt-alkali land, shifting sandy land, nabkha dune) were selected in this study. MWAC dust collectors were used to carry out field observation of near-surface sand-dust transport flux. The horizontal flux and distribution characteristics of sand-dust at different surface heights (10 cm, 25 cm, 50 cm, 85 cm) were observed and analyzed during the observation period. Results showed that the horizontal flux of sand-dust decreased with height following an exponential function. Within 0–85 cm height, the horizontal flux and distribution characteristics of sand-dust on the five typical surfaces were significantly different and the horizontal flux of sand-dust in the 0–10 cm accounted for the largest proportion. The horizontal flux of sand-dust showed a trend that shifting sandy land>playa>reed land>salt-alkali land>nabkha dune. Shifting sandy land and playa are the main sediment transport sources in the western margin of the Badain Jaran Desert. The density of vegetation coverage, the area size of exposed space and the characteristics of soil gravel content directly affected the sand-dust flux that were transported on the surface. Variations of wind speed were likely to affect the distribution of horizontal flux. When wind speed was increased, both the initiated sand particle size and the sand-dust flux were increased. The results could help to understand the dust transport process in the western desert margin, as well as the regional sandstorm process.

Key words: Badain Jaran Desert; sand-dust; horizontal flux; distribution characteristics