

新疆卡拉贝利工程区不同地表风蚀特征

张鹏 尹忠东* 尚河英 兰瑞君

(北京林业大学 水土保持学院,北京 100083)

摘要 为研究干旱地区因开发建设项目区而产生较为强烈的以风蚀为主水土流失风蚀特征,选取新疆卡拉贝利工程区作为研究地点,以原始地表和破坏地表作为研究对象,采用集沙仪和风速仪进行风沙的收集和风速的监测,利用土壤筛和天平进行风蚀物粒径分级测量,并利用 Spss 进行数据统计分析,最终得到了该地区近地表不同下垫面风蚀规律特征。研究表明:破坏地表不同程度地增加了土壤风蚀的可能性,反复碾压地表和弃土场是该地区破坏地表的主要风蚀源;该地区风沙主要集中在距地表高度 30 cm 内,主要土壤风蚀粒径 0~500 μm ;输沙量和风蚀物粒径均随着高度的增加而减小,且输沙量沿高度呈指数函数递减;下垫面性质的不同直接影响了近地表土壤风蚀特征,破坏地表对输沙量的影响主要在近地表 30 cm 内,反复碾压地表对风蚀物粒径的影响主要集中在距地表 50 cm 内,弃土场对风蚀物粒径的影响则超过 55 cm。新疆卡拉贝利工程区不同下垫面地表在土壤可侵蚀性、土壤风沙流结构方面均表现出不同的特征。

关键词 土壤风蚀;下垫面;输沙量;风蚀物粒径;卡拉贝利工程区

中图分类号 S 714.7

文章编号 1007-4333(2016)09-0115-08

文献标志码 A

Characteristic of wind erosion on different surface of construction site located in Cala Beili, Xinjiang

ZHANG Peng, YIN Zhong-dong*, SHANG He-ying, LAN Rui-jun

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract Soil and water erosion in development and construction projects of dry gravel desert area are relatively serious. Xinjiang Cala Beili region was selected as study object. Precise sand samplers and anemometers were set on original surface and destroyed surfaces to collect data. The grading of sediment particles were conducted by using soil sieve SPSS statistical analysis. The results show that: Destroyed surfaces increased the possibility of soil wind erosion, and repeated rolled surface and spoiled surface were the main wind erosion area; The sediment discharge was mainly concentrated in 30 cm height and the mainly erosion practical size were between 0 - 500 μm in this area; With the increase of height, sand particle size and sediment discharge decreases. The sediment discharge decreased with height by exponential function; With the increase of height, the characteristics of soil wind erosion near the surface, were affected by nature of the underlying surface and the impact on sediment discharge and particle size mainly occurs in near-surface 30 cm and 50 cm, respectively. The possibility of soil wind erosion and structure of sand flow underlying different surface in development projects located in Cala Beili of Xinjiang exhibited different characteristics.

Keywords wind erosion; underlying surface; sediment discharge; sediment particle size; development projects of Cala Beili

土壤风蚀是危害干旱、半干旱区的主要环境问题之一,也是造成我国土地沙化和土地生产力下降的主要原因之一^[1-2]。我国作为风沙灾害最为严重

的国家之一,风蚀的治理研究已经成为各级政府和科学家研究的热点^[3]。目前国内外关于土壤风蚀已进行了比较系统的研究,如大风、降水与温度等对土

收稿日期:2015-09-24

基金项目:新疆卡拉贝利水利枢纽工程建设管理局资助(klbl2014003)

第一作者:张鹏,硕士研究生,E-mail:hsst7758@163.com

通讯作者:尹忠东,副教授,主要从事水土保持与荒漠化方向研究,E-mail:yaayp@sina.com

壤风蚀的影响^[4-5],土壤可蚀性、土壤含水量与土壤表面粗糙度等对土壤风蚀的影响,以及植被覆盖对地表保护作用^[6-9]等。其中土壤风沙流结构特征是土壤风蚀研究的核心问题,关于风沙流结构的研究,吴正等^[10]早在20世纪90年代就对流动沙床面的风沙流结构进行了研究,表明流沙地上的输沙量随垂直高度的分布基本满足指数函数,冯大军等^[11]发现非均匀沙床面输沙量的垂向分布在远离床面区符合指数递减规律,哈斯关于腾格里沙漠的野外试验研究结果表明:平沙地和沙丘的迎风坡输沙量沿高度呈单一指数递减规律^[12]。李钢铁^[13]对乌兰布和沙漠不同类型的沙丘风沙流结构进行研究,得出输沙量主要集中在近地表0~6 cm,流动沙丘的输沙量要远大于固定沙丘的结论。然而这些研究主要集中在干旱沙漠区,地表土壤主要为流沙,关于干旱砾漠区的地表土壤风蚀研究较少。随着我国经济的飞速发展,干旱砾漠区的开发建设项目日益增多,其中开发建设项目其造成的土壤流失形式复杂多样且具有显著特征,是一种极为剧烈的人为加速侵蚀^[14],严重制约着开发建设项目区生态可持续发展,关于该部分区域不同下垫面输沙量和风蚀物粒径的空间分布等的风沙流结构特征的研究具有重要意义。研究选取新疆卡拉贝利工程区作为研究区域,该地区属于干旱地区,年平均降水量仅为120 mm,且多大风天气,以风蚀为主的水土流失尤为严重,项目建设方已把该地区的防治风蚀工作列为该工程的重要工作,但是关于该地区风蚀特征的研究甚少。本研究以期通过准确认识和把握该地区不同地表下垫面土壤风蚀特征及风蚀物沿高度的变化规律,为减少该地区水土流失、防治风沙灾害提供理论依据。

1 研究区概况

选取卡拉贝利水利枢纽工程区作为研究地点,该工程区位于新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州乌恰县境内,上距乌恰县城70 km,下距喀什市165 km,地理位置73°30'E~77°30'E,38°00'N~40°30'N。工程区地处天山与西昆仑山交汇地带的中山地区,平均海拔1 847.0 m,属于典型的温带干旱气候区,多年平均气温10.6℃,极端最高气温34.7℃,极端最低气温-29.9℃。年平均降水量120 mm,最大日降水34 mm,年平均蒸发量3 306.91 mm,降雨和蒸发量主要集中在4—9月。多年平均风速1.9 m/s,每月平均最大风速9.5—19.7 m/s,年风速大于

10 m/s的时间为78 d,大风一般从3月开始,其中大风天气主要发生在5—7月,多为西北风。该地区土壤为棕漠土,有机质含量在10 g/kg以下,工程区河谷两岸基岩裸露,地表为洪积碎石、沙土等,下部含砂砾石,表土质地为粉土,有大量砾石裸露或覆盖,未破坏部分已结皮不易发生风蚀。工程区内植被稀少,主要生长盐爪爪、骆驼刺、无叶假木贼等旱生植物,植被覆盖度低^[15]。试验点主要分布在项目区的项目部生活区附近和工程区弃土场附近。

2 研究方法

2.1 不同下垫面基本特征调查

卡拉贝利工程区的风蚀可分为两部分,一部分来源于建设区原始地表,另一部分源于开发建设过程中破坏的地表。为了分析该地区不同下垫面的风蚀特征,选取了原地表和开发建设过程中常见的破坏地表进行调查,破坏的地表包括反复碾压地表、翻耕地表以及弃土场,其中反复碾压地表选址为施工区经过车辆和人畜反复碾压踩踏的地表、翻耕地表为生活区因植被绿化所采取的人为客土翻耕区域、弃土场则为工程区弃土和弃渣堆放区域,每种地表在工程区地面积均>5 000 m²。在每个调查地表中选择代表型区域,利用罗盘和皮尺分别设置1个50 m×50 m样地,在每个样地中沿对角线等间距设置3个5 m×5 m样方,测量区域植被冠幅,结皮长、宽,并根据冠幅和结皮形状,并根据样方面积计算覆盖度以及土壤结皮情况,同时在每个样方中心位置用环刀取土样,计算土壤容重,用土壤筛对土样进行分级筛分,并用精细天平称量每个粒径级的重量,从而分析土壤颗粒构成。在不同下垫面中选择平整地点作为测点,按照Musick等^[16]的试验方法,在测点后放置一条白色的胶带,在大风天气中,由2名观测人员进行配合试验,当观察人员观察到胶带上吹蚀掉的颗粒物存在时,记录人员记下该地点距地面高度2 m处的瞬时风速,分别测量10组数据,求其平均值,从而获得该下垫面的起沙风速。

2.2 风蚀物空间分布调查

分别在不同下垫面调查样地边缘选取观测点放置3个集沙仪,保证集沙仪底层与地面平齐,同时利用指南针确保各组集沙仪开口方向一致,由于该地区大风日主要为西北风,因此本研究集沙仪采用组合式多通道通风集沙仪^[17],集沙仪由不锈钢矩形气

流管和无纺布袋以及集沙仪框架组成,气流管入口横截面为 $3\text{ cm}\times 3\text{ cm}$,长度为 10 cm ,集沙袋为流线型构造,袋口周长 15 cm ,带边缘周长 20 cm ,长度 20 cm ,集沙仪框架有3列竖架,集沙口共19层通道采用阶梯布设,采集器中心点距地面高度分别为 1.5 、 4.5 、 7.5 、 10.5 、 13.5 、 16.5 、 19.5 、 22.5 、 25.5 、 28.5 、 31.5 、 34.5 、 37.5 、 40.5 、 43.5 、 46.5 、 49.5 、 52.5 和 55.5 cm ,集沙仪为不可转动式集沙仪,入口始终对准西北方向(主风向)。为尽可能减小地块长度对风蚀量影响,集沙仪安置点距测量地表边界沿主风向均大于 100 m ^[18-19]。将集沙仪每层收集的风蚀物进行称量、筛分和分析,根据风蚀物不同粒径范围的筛分结果,将每一个粒径筛分范围中值作为代表,按其粒径筛分范围粒径质量百分比,并对各项粒径做加权平均,最终得到平均粒径。采用指数、幂函数等不同的函数,拟合不同下垫面集沙仪的实测输沙量和风蚀物粒径沿高度的变化规律,从而得到不同下垫面的风蚀物空间分布情况。

利用 Excel、Spss20.0 及 Origin9.1 对调查数据进行分析、处理、模型模拟以及图形绘制,数据为2014年5—7月和2015年4—6月在卡拉贝利工程区采样和试验调查所得,其中集沙仪集沙试验于2015年5月24日—6月2日在试验地点进行了连续观测。集沙仪观测期间西北风天数为8d,其中大风天气(该天存在小时平均风速超过 8 m/s 的情况)为5d,利用风速自动记录仪对距地 2 m 处风速进

行测量,测量频率为 15 min ,并以乌恰县卡拉贝利水电自动气象观测站的气象数据作为多年风速情况的参考。

3 结果与分析

3.1 下垫面基本特征

3.1.1 下垫面地表特征

土壤的结皮率和植被覆盖度与地表土壤风蚀有着密切的关系,土壤结皮的形成是土壤抵抗风蚀的一种自我保护,由于结皮的形成使得土壤的抗剪能力得到提高,能有力地防止风的剥蚀^[20],而植被覆盖在风蚀过程中可通过多种途径保护地表土壤,减少风蚀输沙^[21]。根据调查结果可知(表1):破坏地表的土壤结皮率由原始地表的 $>90\%$ 降至 50% 以下,其中以反复碾压地表和弃土场最低,其土壤结皮率均 $<10\%$;相比于原始地表 $2\%\sim 20\%$ 植被覆盖度,破坏地表中均无植被覆盖。结合不同下垫面起沙风速的调查结果可知,原始地表起沙风速最大,为 9.3 m/s ,破坏地表中,翻耕地表、反复碾压地表、弃土场的起沙风速依次减小,其起沙风速分别为 8.9 、 7.2 和 6.6 m/s ,相比于原始地表,翻耕地表、反复碾压地表、弃土场的起沙风速分别减小了 0.4 、 2.1 和 2.7 m/s 。由此可见,同下垫面的起沙风速与土壤结皮率和植被覆盖度的大小存在正相关的关系,破坏地表由于地表土壤结皮和植被的破坏,其土壤风蚀的可能性也随之增加。

表1 观测点下垫面特征

Table 1 The characteristics of different underlying surfaces

地表类型 Underlying surface type	地表性质 Underlying surface characteristics	起沙风速/(m/s) Sand wind speed
原始地表	结皮地表为主(结皮率 $>90\%$),植被覆盖度 $2\%\sim 20\%$	9.3
翻耕地表	松散土壤为主(土壤结皮率 $<50\%$),无植被覆盖	8.9
反复碾压	松散土壤为主(土壤结皮率 $<15\%$),无植被覆盖	7.2
弃土场	松散土壤为主(土壤结皮率 $<10\%$),无植被覆盖	6.6

3.1.2 下垫面土壤颗粒组成

土壤粒径大小能反映风蚀发生的难易程度,有研究把粒径 $>0.84\text{ mm}$ 、粒径为 $0.50\sim 0.84\text{ mm}$ 和粒径 $<0.50\text{ mm}$ 的土壤颗粒分别作为难侵蚀颗粒、较难侵蚀颗粒、易侵蚀颗粒^[21]。根据该划分标准对不同下垫面土壤进行取样并做粒度分析(图1)。从

图1中可以看出,原始地表土壤易侵蚀颗粒比例仅为 1.0% ,风蚀作用很弱,而被破坏的地表中,其土壤易侵蚀颗粒的比例都有不同程度的提高,其中以反复碾压地表最大,为 16.7% ,弃土场次之,其比例为 16.7% ,翻耕地表土壤易侵蚀颗粒比例最小,为 12.6% ,即反复碾压地表、弃土场和翻耕地表土壤易

侵蚀颗粒比例分别为原始地表的 16.7、12.6 和 6.4 倍,土壤难侵蚀颗粒比例则表现为:原始地表(98.9%)>翻耕地表(91.8%)>弃土场(83.6%)>反复碾压地表(81.3%)。因此,从土壤颗粒组成的

角度来看,工程区开发建设过程中,遭到破坏的地表由于土壤结构的破坏,土壤破碎化程度增加,使得土壤风蚀可能性不同程度的增加,具体表现为:反复碾压地表>弃土场>翻耕地表>原始地表。

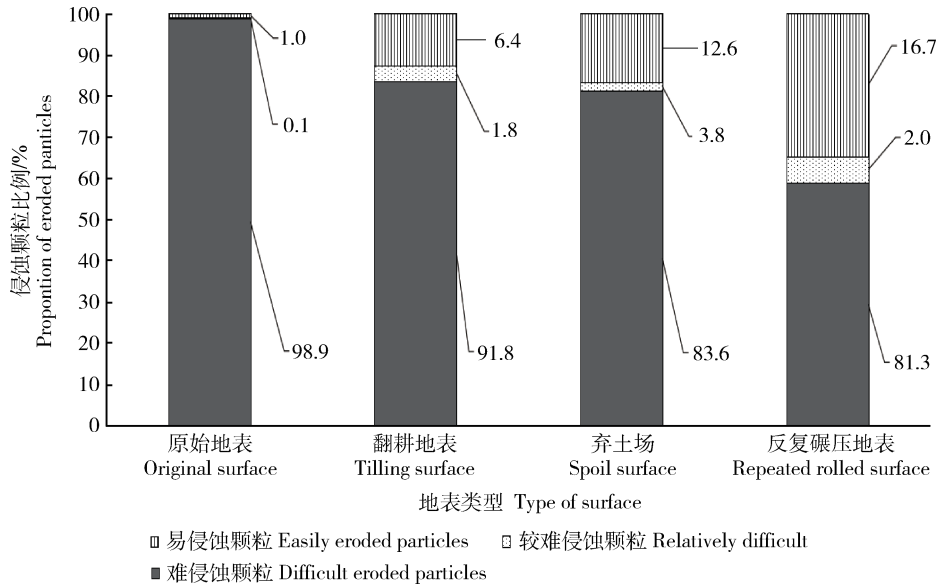


图 1 不同下垫面土壤可蚀性

Fig. 1 The possibility of soil erosion on different underlying surfaces

综合不同下垫面的地表状况和土壤颗粒组成情况可知,相比于原始地表,受到破坏的地表土壤结皮率和植被覆盖度降低、地表起沙风速减小、土壤易侵蚀颗粒比例增加,加大了土壤发生风蚀可能性,其中以弃土场和反复碾压地表变化最为显著。由于该地区翻耕地表起沙风速相对较大,土壤侵蚀易侵蚀颗粒少,而且会在短期内种植植被,造成下垫面性质的改变,不具典型性,因此不作为研究重点,最终本研究选取工程区土壤可蚀性高、代表性强的反复碾压地表和弃土场以及原始地表 3 种下垫面做进一步的风沙特征研究。

3.2 输沙量随高度的分布规律

掌握不同地表条件下输沙量随高度的分布特征,对风沙防治工作尤为重要。通过对 3 种地表连续 9 d 的风沙测量,并对不同监测点集沙仪中的风蚀物进行收集和称量,获得距地表 60 cm 以内的输沙量随高度的变化规律(图 2)。由于不同下垫面集沙仪安装和获取的时间相同,因此可利用单位面积输沙量作为输沙量参数对比不同下垫面的输沙量特征。

1) 不同下垫面同一高度上,反复碾压地表与弃土场各层输沙量均大于原始地表,在 0~20 cm 高度

内,输沙量表现为:反复碾压地表>弃土场>原始地表,高度超过 20 cm 时,输沙量表现为:弃土场>反复碾压地表>原始地表。随着高度的增加破坏地表与原始地表在同一高度上的输沙量差异逐渐减小,在 0~30 cm 高度,反复碾压地表和弃土场与原始地表输沙量的差值分别由 1.5 cm 高度处 48.7 和 16.4 g/cm² 减小至 28.5 cm 高度处 6.1 和 6.6 g/cm²,高度超过 30 cm,破坏地表与原始地表同一高度的输沙量近为一致,其差值均在 5.5 g/cm² 以内。由此可知,地表性质的不同,会对近地表输沙量

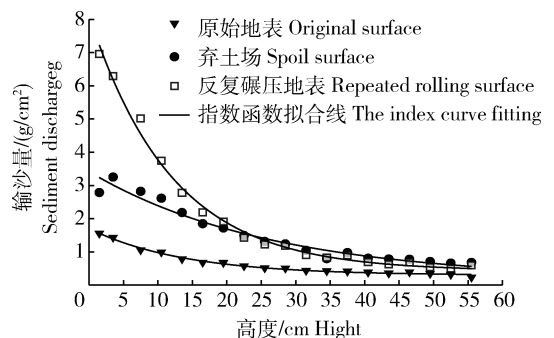


图 2 不同下垫面输沙量随高度的变化

Fig. 2 Sediment distribution along height on different underlying surfaces

产生影响,且越接近地表影响越显著,由于弃土场和反复碾压地表相比于原始地表土壤可蚀性高,因此不同高度上输沙量高于原始地表,而这种现象主要集中在 0~30 cm 高度,即该地区破坏地表对输沙量的影响主要在近地表 30 cm 内。

2)随高度的增加,不同下垫面输沙量均呈递减趋势,递减速率整体表现为:反复碾压地表>弃土场>原始地表,其中反复碾压和弃土场在距地高度 30 cm 内、原始地表在距地 15 cm 内,输沙量随高变化明显。根据不同下垫面集沙仪 19 个收集高度的风沙量可知,距地高度 15 cm 内,分别集中了原始地表、弃土场、反复碾压地表输沙量的

41.8%、56.6%和 40.1%,而距地高度 30 cm 内,集中了原始地表输沙量的 72.7%、弃土场输沙量的 74.6%和反复碾压地表的 84.4%,由此可见,该地区沙粒的运动主要集中在地表 30 cm 附近,与前人研究结果类似^[21-22]。利用 Spss 18.0 统计软件,对输沙量实测数据随高度的变化规律,采用线性、指数、对数、幂函数等不同的函数形式进行拟合,发现采用指数拟合的曲线程度较高(表 2),因此可知输沙量随高度分布符合传统的指数分布规律^[23],即不同下垫面,随着高度的增加输沙量呈指数递减(图 2),其递减公式为表 2 中最优模型公式。

表 2 不同下垫面输沙量与高度拟合模型

Table 2 The fitting model of sediment discharge and height on different underlying surfaces

下垫面性质 Underlying surface characteristics	R ²			最优模型公式 Optimal model
	R ₁ ²	R ₂ ²	R ₃ ²	
原始地表	0.80	0.95	0.94	Y=12.21e ^{-0.09x}
反复碾压	0.73	0.93	0.95	Y=55.04e ^{-0.150x}
弃土场	0.88	0.87	0.95	Y=30.14e ^{-0.10x}

注:R₁²、R₂²、R₃² 分别表示线性函数、幂函数、指数函数的模型判定系数,其值越接近 1,模型拟合程度越高;Y 为输沙量,g/cm²,x 为距地面高度,cm。

Note: R₁²、R₂²、R₃² represent determination coefficient of linear function, power function and exponential function model, the fitting degree is higher when its value close to 1; Y is sediment discharge, g · cm⁻², x is high from ground, cm.

3.3 不同下垫面风蚀物粒径特征

利用土壤筛对 3 种下垫面集沙仪收集的风蚀物进行筛分,获得不同下垫面风沙粒度特征(图 3)。从图 3 中可以看出,该地区侵蚀物粒径为 0~2 000 μm,其中 0~500 μm 为主要侵蚀颗粒,该结果与风洞试验结果研究结论较为一致^[2,24]。原始地表、反复碾压地表、弃土场,粒径小于 500 μm 的风蚀物分别占总侵蚀量的 98.0%、96.7%、96.3%,其中粒径小于 250 μm 的风蚀物分别占总侵蚀量的 95.5%、90.7%、86.8%。弃土场和反复碾压地表粒径为 100~250 μm 的风蚀物粒径比例最高,分别占总侵蚀量的 36.8%、37.4%,原始地表粒径为 50~100 μm 的风蚀物比例最高,占总侵蚀量的 37.3%。根据美国制粒级分类标准可知^[25],2~50、50~100、100~250、250~500、500~1 000、1 000~2 000 μm 分别为粉粒、极细砂、细砂、中砂、粗砂和极粗砂,因此可知,破坏地表相对于原始地表主要侵蚀颗粒大

小有所增加,其中原始地表的极细砂、弃土场和反复碾压地表的细砂最易发生风蚀。

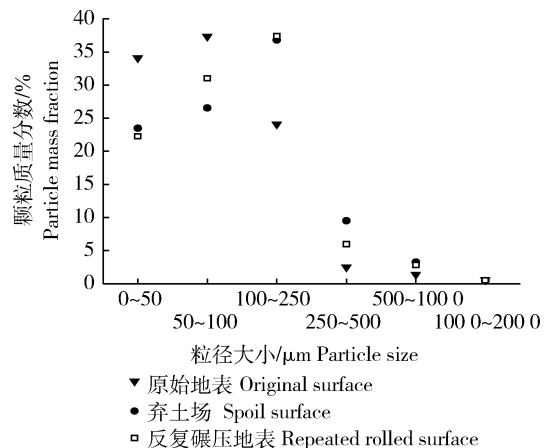


图 3 不同下垫面风蚀物粒径特征

Fig. 3 The characteristics of sediment size on different underlying surfaces

3.4 风蚀物粒径随高度的分布规律

不同高度的风蚀物粒度组成可反映风在不同高度的搬运能力^[26],不同下垫面风蚀物粒径与高度的关系如图4:

1)随着高度的增加,不同下垫面风沙的平均粒径均呈现减小趋势,但具体的减小趋势却呈现不同的状态。随高度增加,原始地表的风蚀物粒径呈现“先陡后缓”的递减趋势,弃土场和反复碾压地表则呈现“先缓后陡再缓”的递减趋势。具体表现为:原始地表在15cm高度内,风蚀物粒径随高度变化明显,平均粒径变幅为33 μm;15~50 cm高度风蚀物粒径变化逐渐减小,变幅为10.2 μm,最终趋于73.0 μm;弃土场和反复碾压地表30 cm高度内,风蚀物粒径变化不显著,平均粒径变幅分别为15.6和9.9 μm,30~50 cm高度平均粒径变化明显,变幅分别为33.1和43 μm,超过50 cm,二者变化趋缓,最终分别趋近于105.0和80.5 μm。由此可见,破坏地表与原始地表在高度在小于50 cm时平均粒径变化趋势差别明显。

2)不同下垫面的同一高度,风蚀物平均粒径均表现为弃土场>反复碾压地貌>原始地表,根据不同下垫面同一高度的平均粒径差值可知:55 cm高度以内,不同下垫面同一高度上弃土场与反复碾压地表风蚀物粒径差异较小,二者差异小于30 μm,弃土场与原始地表差异较大,同一高度上风蚀物粒径差异度均>30 μm,反复碾压地表与原始地表在10~40 cm粒径差别较大,其差异>30 μm,其余高度差异均小于30 μm。同时,以纵坐标为基准做垂线可知,同一平均大小的粒径,弃土场风蚀物运移高度最高,反复碾压地表次之,原始地表最低,即破坏地表风蚀物的平均跃移高度有所增加,其中弃土场最为明显。图3中破坏地表风蚀物粒径均主要在100~250 μm,即相比于原始地表,破坏地表在100~250 μm的风蚀物粒径平均越移高度增加最为明显。

因此可知,原始地表和破坏地表的大粒径风沙分别主要集中在15和30 cm高度内,弃土场和反复碾压地表影响了地表风沙流结构,相对于原始地表,破坏地表在不同高度上风蚀物粒径均有所增加,其中弃土场最为显著,结合3种下垫面粒径随高度的变化趋势和同一高度平均粒径差异可知,反复碾压地表对风蚀物粒径的影响主要集中在距地表50 cm内,弃土场对风蚀物粒径的影响则超过55 cm。

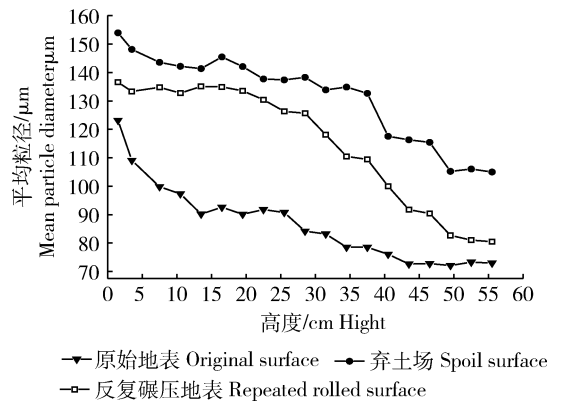


图4 不同下垫面风蚀物粒径随高度的变化

Fig. 4 Sediment size distribution along height on different underlying surfaces

4 结论

1)破坏地表不同程度地增加了土壤风蚀的可能性,其中反复碾压地表和弃土场是该地区破坏地表的主要风蚀源,其起沙风速分别为7.2和6.6 m/s,土壤易侵蚀颗粒比例分别为16.7%和12.6%,相比于原始地表,反复碾压地表和弃土场起沙风速分别减小2.1和2.7 m/s,土壤易侵蚀颗粒比分别增加15.7%和11.6%。

2)该地区风沙运动主要集中在距地表高度30 cm内,在该高度范围内原始地表、弃土场和反复碾压地表的输沙量分别达到72.7%、74.6%和84.4%,不同下垫面输沙量随着高度的增加而呈指数函数递减,递减速率表现为反复碾压地表>弃土场>原始地表,其递减函数分别为 $Y = 55.04e^{-0.150x}$ 、 $Y = 30.14e^{-0.10x}$ 、 $Y = 12.21e^{-0.09x}$ 。

3)该地区的主要土壤风蚀物粒径为0~500 μm,原始地表、反复碾压地表、弃土场小于500 μm的风蚀物,分别占总侵蚀量的98.0%、96.7%、96.3%,其中原始地表的极细砂、弃土场和反复碾压地的细砂为最易侵蚀颗粒。

4)不同下垫面同一高度上,风蚀物平均粒径均表现为弃土场>反复碾压地貌>原始地表,随着高度的增加,风蚀物的粒径逐渐减小,原始地表、和破坏地表的大粒径风蚀物分别主要集中在距地15和30 cm高度内。

5)下垫面性质的不同直接影响了近地表土壤土壤风蚀特征,破坏地表对输沙量的影响主要在近地表30 cm内,反复碾压地表对风蚀物粒径的影响主

要集中在距地表 50 cm 内,弃土场对风蚀物粒径的影响则超过 55 cm。

参 考 文 献

- [1] 孙悦超,麻硕士,陈智,赵永来,孙宇瑞. 阴山北麓干旱半干旱区地表土壤风蚀测试与分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 1-5
Sun Y C, Ma S S, Chen Z, Zhao Y L, Sun Y R. Test and analysis of wind erosion of land surface soil in arid and semi-arid regions in north areas of Yinshan Mountain [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(12): 1-5 (in Chinese)
- [2] 董光荣,李长治,高尚玉,吴丹. 关于土壤风蚀风洞模拟实验的某些结果[J]. 科学通报, 1987(4): 297-301
Dong G R, Li C Z, Gao S Y, Wu D. The results of wind tunnel simulation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1987(4): 297-301 (in Chinese)
- [3] 张瑞麟. 浑善达克沙地黄柳活沙障的设置及防风固沙作用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007
Zhang R L. Study on the planting and effects of wind-breaking and sand-fixation of living *salix gordegevi* barrier in Hunsandake sand land [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2007 (in Chinese)
- [4] Chepil W S. Climatic factor for estimating wind erodibility fields[J]. *Soil Water Conservation*, 1962, 17(4): 162-165
- [5] Skidmore E L. Wind erosion climatic erosivity [J]. *Climatic Change*, 1986, 9(1): 195-208
- [6] 刘铁军, 珊丹, 郭建英, 高天明, 赵显波. 东北黑土区土壤风力侵蚀及发展趋势分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(36): 22387-22389
Liu T J, Shan Dan, Guo J Y, GAO T M, Zhao X B. Analysis on status and development trend of wind erosion in black earth region of Northeast China [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2011, 39(36): 22387-22389 (in Chinese)
- [7] 张华, 李锋瑞, 张铜会, 李玉霖, 苏永忠. 春季裸露沙质农田土壤风蚀量动态与变异特征[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 29-32
Zhang H, Li F R, Zhang T H, Li Y L, Su Y Z. Field observations of wind erosion sediment in bare sandy farmland during erosion-prone spring [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(1): 29-32 (in Chinese)
- [8] 董治宝, Donald W, Fryrear, 高尚玉. 直立植物防沙措施粗糙特征的模拟实验[J]. 中国沙漠, 2000(3): 29-32
Dong Z B, Donald W. Fryrear, Gao S Y Modeling the Roughness Effect of Blown-sand-controlling Standing Vegetation in Wind Tunnel [J]. *Journal of desert research*, 2000(3): 29-32 (in Chinese)
- [9] Raupach M R. Drag and drag partition on rough surfaces[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1992, 60(4): 375-395
- [10] 马示威, 马玉明, 姚洪林. 沙漠学[M]. 北京: 人民出版社, 1998: 30-34
Ma S W, Ma Y M, Yao H L. *Eremology* [M]. Beijing: Peoples Publishing House, 1998: 30-34 (in Chinese)
- [11] 冯大军, 倪晋仁, 李振山. 风沙流中沙粒粒度的垂直和水平分布特征[J]. 泥沙研究, 2008(5): 22-30
Feng D J, Ni J R, Li Z S. Vertical and horizontal profiles of grain size in aeolian sand transport [J]. *Journal of Sediment Research*, 2008(5): 22-30 (in Chinese)
- [12] 哈斯. 腾格里沙漠东南缘沙丘表面风沙流结构变异的初步研究[J]. 科学通报, 2009, 49(11): 1099-1104
Ha S. The research of variation of flow structure sand dunes surface in southeast tengger desert edge [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 49(11): 1099-1104 (in Chinese)
- [13] 李钢铁, 贾玉奎, 王永生. 乌兰布和沙漠风沙流结构的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(S1): 276-278
Li G T, Jia Y K, Wang Y S. The research of sand flow structure in Ulan buh desert [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004, 18 (S1): 276-278 (in Chinese)
- [14] 王治国, 李文银, 蔡继清. 开发建设项目水土保持与传统水土保持比较[J]. 中国水土保持, 1998(10): 16-18
Wang Z G, Li W Y, Cai J Q. Comparison of soil and water conservation in development projects with normal soil and water conservation [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1998(10): 16-18 (in Chinese)
- [15] 尚河英, 尹忠东, 张鹏. 盐爪爪沙堆形态特征及其固沙能力分析: 以卡拉贝利工程区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(4): 80-83
Shang H Y, Yin Z D. An analysis on Kalidium foliatum morphology and the sand fixation ability of Nebkha; A case study in Cala Beili engineering area [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(4): 80-83 (in Chinese)
- [16] Musick H B, Trujillo S M, Truman C R. Wind tunnel modeling of the influence of vegetation structure on saltation threshold [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21: 589-605
- [17] 朴起亨. 几种不同材料机械沙障防风效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010
Pu Q H. Effects of different sand barriers on wind-break and sand fixation [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010 (in Chinese)
- [18] Hagen L J. WEPS technical documentation; Erosion submodel. SWCS WEPP/WEPS Symposium [R/OL]. Agricultural Engineer, USDA, ARS. DA-ARS, Wind Erosion Research Unit, Manhattan, Kansas, USA. (2015-10-06). <http://www.weru.ksu.edu/weps>
- [19] Skidmore E, Powers D. Dry soil-aggregate stability: Energy-based index [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(6): 1274-1279
- [20] 李晓丽, 申向东. 结皮土壤的抗风蚀性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 205-207

- Li X L, Shen X D. The analysis on the mechanism of anti-wind erosion of soil crust [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(2): 205-207 (in Chinese)
- [21] 黄富祥, 王明星, 王跃思. 植被覆盖对风蚀地表保护作用研究的某些新进展[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(5): 627-633
Huang F X, Wang M X, Wang Y X. Recent progress on the research of vegetation[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(5): 627-633 (in Chinese)
- [22] 王萍, 王燕. 民勤荒漠-绿洲过渡带不同下垫面条件的土壤风蚀特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(11): 138-145
Wang P, Wang Y. Characteristics of aeolian sediment under different underlying surfaces in oasis-desert transitional region of Minqin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(11): 138-145 (in Chinese)
- [23] 胡海华, 吉祖稳, 曹文洪, 石雪峰. 风蚀水蚀交错区小流域的风沙输移特性及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(5): 20-25
Hu H H, Ji Z W, Cao W H, Shi X F. Wind-sand flow transportation characteristics and effect factor of typical valley in wind-water erosion crisscross region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(5): 20-25 (in Chinese)
- [24] Chepil W S. Dynamics of wind erosion: Initiation of soil movement by wind[J]. *Soil Science*, 1952, 75: 473-483
- [25] 高广磊, 丁国栋, 赵媛媛, 冯薇, 包岩峰, 刘紫葳. 生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 115-120
Gao G L, Ding G D, Zhao Y Y, Feng W, Bao Y F, Liu Z W. Effects of biological soil crusts on soil particle size characteristics in Mu Us sandland [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1): 115-120 (in Chinese)
- [26] 李晓丽, 申向东. 裸露耕地土壤风蚀跃移颗粒分布特征的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 26(5): 74-77
Li X L, Shen X D. Experimental study on the distribution characteristics of the saltation particle of Aeolian sediment in bare tillage [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(5): 74-77 (in Chinese)

责任编辑: 王燕华