

西柳沟孔兑下垫面特征及风沙输移规律研究

邬秉承¹, 党晓宏^{1,2}, 赵宏胜³, 李浩天⁴

内蒙古农业大学 沙漠治理学院 2.包头 包头市林业和草原局)

摘 要: 黄河上游十大孔兑对黄河生态和周边地区发展存在严重威胁。通过样方调查划分下垫面类型和利用集沙仪和 HOBO 小型数采仪配套三杯风速仪及风向标对各个下垫面的输沙量和风速、风向进行观测, 对十大孔兑之一西柳沟风沙区展开研究, 探究该地区不同下垫面特征及风沙输移规律, 为相似流域保护与治理提供参考依据。结果表明: (1) 西柳沟孔兑风沙区下垫面划分为流动沙地、半固定沙地和固定沙地, 流动沙地河床面积、长度和宽度均高于固定和半固定沙地。(2) 研究区盛行风均为西南风, 主害风为西北风; 且近地面风速变化随距离地表高度的增加呈现递增趋势。(3) 处在相同的下垫面类型中, 随着距离地表高度增加, 输沙率呈现减少的趋势。处在不同下垫面时, 由于地表粗糙度不同, 处在相同地表高度的输沙率也不相同, 也呈现减少的趋势, 表明地表粗糙度对于沙粒的运动有着一定的阻碍作用。

关键词: 西柳沟; 下垫面; 风沙运动; 输沙量

Study on The Characteristics of the Underlying Surface of Xiliugou Hole and The Law of Aeolian Sand Transport

Abstract: The ten major Kongdui in the upper reaches of the Yellow River pose a serious threat to the ecology of the Yellow River and the development of the surrounding areas. Through the sample survey, the type of the underlying surface was divided and the sand collecting instrument and HOBO small data collection instrument were used to observe the sand transport volume, wind speed and wind direction of each underlying surface, and the wind and sand area of Xiliugou, one of the ten major Kongdui, were studied, and the characteristics of different underlying surfaces and the law of aeolian sand transport in the area were explored, which provided a reference basis for the protection and treatment of similar river basins. The results showed that: (1) The underlying surface of the Xiliugou hole to aeolian sand area was divided into flowing sand, semi-fixed sand and fixed sand, and the area, length and width of the riverbed of the flowing sand were higher than that of fixed and semi-fixed sand. (2) The prevailing winds in the study area were all southwest winds, and the main harmful winds were northwest winds; Moreover, the change of wind speed near the ground showed an increasing trend with the increase of the height from the surface. (3) In the same underlying surface type, with the increase of the height from the surface, the sand transport rate showed a decreasing trend. When there are different underlying surfaces, due to the different surface roughness, the sand transport rate at the same surface height is also different, and it also shows a trend of reduction, indicating that the surface roughness has a certain hindering effect on the movement of sand grains.

Key Words: Xiliugou; Lower cushion surface; Wind and sand movement; The amount of sand transported

荒漠化是当今国际社会普遍关注的重要的环境问题, 它和气候变化, 生物多样性和共同组成的当今社会的三大科技前沿。环境的恶化和人类的活动致使大量的农田荒漠化, 它不仅使土地生产力降低, 而且还使土地资源大量流失, 还给工农业生产、交通运输等带来了极大的冲击。荒漠化问题严重限制了人类的发展, 甚至对人类的生存造成了威胁。随着经济的发展, 人们逐渐开始关注和重视这一世界性的问题。目前, 世界上大约有 15 亿人口面临着荒漠化的直接威胁, 每年损失 1200 万 hm^2 的可利用耕地^[1], 沙漠化影响着全世界陆地面积的四分之一。并且世界上近 10 亿的人口也正在遭受荒漠化的影响^[2,3]。由于荒漠化的影响, 每年造成的经济损失高达 423.08 亿美元^[4,5], 我们的国家也正在遭受风沙的威胁, 在世界上也是属于荒漠化最严重的一类国家, 遭受荒漠化的土地面积占全部国土面积的 27%左右^[6], 每年的风蚀沙害都对

人民的生命造成严重的威胁，给人民的财产造成极大的损失。

西柳沟地处于内蒙古的中西部，是一个强降雨的中心地带。暴雨洪水多发。洪水中淤积沉积下的泥沙，大部分由雨水形成的地表径流对丘陵沟壑区地表土壤的冲刷，剩下的一部分是由于风的侵蚀和搬运作用，讲沙物质带到河床内，然后经过堆积形成的，该区域的侵蚀主要是风力侵蚀和搬运作用和水冲刷侵蚀共同作用形成的。由于西柳沟河道短，比降大，其上游经过库布齐沙漠，独特的地形特征使西柳沟形成了强烈的暴雨洪涝灾害，且洪峰流量大，泥沙含量高，其形成机制尚不明确。此外，由于西柳沟地区经常遭遇巨大的降水量，所以经常遭受洪水的威胁，洪水会携带大量的沙物质，淤堵河道，对黄河造成了极为重大的威胁。据调查显示，从 1958 年到 2010 年的 50 多年中，西柳沟流域连续发生了 15 次较大的洪水灾害^[7]，七次水沙淤堵黄河。西柳沟流域的水土保持综合治理从二十世纪六十年代就开始了。但是直到二十世纪九十年代之前，其治理成效都不是很明显^[8]。究其原因，主要是由于资金投入较少，治理规模较小，因此在 20 世纪 90 年代以后，西柳沟流域就开始了对水土保持的综合治理。例如退耕还林还草，修建淤地坝等^[9]，逐渐取得了显著成效。关于西柳沟的研究资料到 2012 年就停止了，根据前面学者的研究资料来分析，这其中的内容表示：关于治理水土流失的部分，西柳沟已经达成控制水土流失面积 416.4km² 的成就，治理度为 32.7%，其中：农民耕作的田地 2160hm²，用来治理水土流失的树林 35310hm²，用人工种植的草地 1320hm²，封禁治理 2850hm²。修筑了 109 座淤地坝，控制的面积能达到 261.3km²，总共的拦蓄水沙的量达到 5514.5 万 m³，其中拦泥库容 2886 万 m³；其他小型拦蓄工程 209 座。但是由于治理十分复杂，遇到的技术难题很多、投入的资金也比较少、开展的工程规模也很小，并且河道里面安装的控制泥沙的坝体数量也比较少，这致使不能有效的控制洪水和河道内的泥沙。造成了非常严重的洪水危害。

目前我国现有的研究集中在对西柳沟水沙方面的研究，对西柳沟风沙运动的规律研究内容相对较少。鉴于此，本文选取西柳沟孔兑中游，穿过库布齐沙漠区的一段作为研究对象，通过对西柳沟孔兑不同下垫面风况和输沙率的分析，来探究西柳沟孔兑的风沙运动规律，为减少土地流失，保持水土和治理风沙危害提供的一定的理论依据和实测资料。

1 研究区概况

西柳沟孔兑全长 106.5km，流域总面积 1193.8km²，中游风沙区长约 18km，面积 280.7km²，河床东岸植被盖度优于河床西岸。最高沙丘达 38m，最低 1m，高度 $H > 10\text{m}$ 沙丘区域约占流动沙地面积的 59%，高度 $5\text{m} < H < 10\text{m}$ 沙丘区域约占流动沙地面积的 26%，高度 $H < 5\text{m}$ 沙丘区域约占流动沙地面积的 15%。

西柳沟孔兑属于典型干旱大陆性气候，风大沙多，气候干燥，地处风蚀沙化和水土流失重叠区。主害风为西北风，年均风速 3.1 m/s，风力 5 -8 级，沙尘暴集中发生于每年 3-5 月，风速最高可达 14m/s；年平均蒸发量（2200 mm）是降水量（305.9 mm）的 7 倍多，土壤类型主要为栗钙土和粗骨性栗钙土。

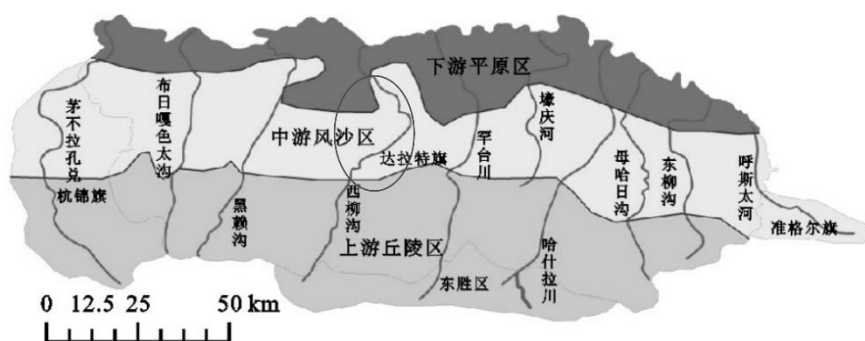


图 1 研究区位置

Fig.1 study area location

西柳沟孔兑属于典型的半干旱大陆性气候，气候十分干燥并且多风，冬季气温低而且持续时间长，夏季气候炎热并且持续时间短暂，温差极大，全年干旱少雨。降雨主要是强降雨，雨季一般以七月份和八月份为主，全年有一半以上的降水都来源于雨季。该区域在春冬两季常常有沙暴出现，年平均大风天数为 24d，瞬间最大风速可达 28m/s，相当于十级大风。该地区春季和冬季两个季节强烈的风沙活动和夏季和秋季强烈的降雨所引起的季节性风水交替作用，是本区域典型的自然气候特征。

3 研究内容与方法

本研究目的是利用 HOBO 风速数据采集仪器对不同下垫面的风速风向进行观测，同时采用集沙仪对不同下垫面各风速条件下输沙量进行观测，根据西柳沟孔兑的风力强度和输沙率的组合情况，划分该地区的风沙环境。对起沙风的风况和输沙势进行深入的研究分析，来为该地区沙漠化的防治提供科学参考。

3.1 研究内容

(1) 划分不同下垫面类型

选取西柳沟孔兑作为研究对象，根据植被覆盖度的不同，将植被覆盖度大于 40% 的沙地划分为固定沙地，植被覆盖度 15%~40% 的沙地划分为半固定沙地，植被覆盖度小于 15% 的沙地划分为流动沙地。

不同下垫面的风况

利用 HOBO 小型数采仪配套三杯风速仪及风向标对各个下垫面的风速和风向进行观测，研究西柳沟孔兑的起沙风风向，并分析不同下垫面地表粗糙度对近地面风速的影响。

(3) 不同下垫面的输沙率

利用集沙仪对地表起沙进行采集，研究不同下垫面的输沙通量，分析研究地表粗糙度对输沙通量的影响。

3.2 研究方法

3.2.1 样方调查

选择一个植物空间分布较均匀的调查点，使其具备良好的代表性。在每个选定的调查点上，统设 20 个 10m×10m 灌木样方，清查样地内所有灌木、草本植物种类组成，并利用生态学“三度一量”法测定植株基本特征。

3.2.2 不同下垫面划分

划分依据见表 1:

表 1 沙地类型划分依据标准

Tab 1 Criteria for classification of sandy land types

序号	植被盖度	沙地类型
1	>30%	固定沙地
2	10%~29%	半固定沙地
3	<10%	流动沙地

3.2.3 输沙量测定

选取大风天气，提前在观测点位布设集沙仪，布置集沙仪要先将底座埋在地下，保证最低的进沙口与地面高度保持一致，布置后要确保每个进沙口都与地表保持水平，并且对准主风向。布设过程中要先用胶带贴住进沙口，防止布置集沙仪过程中有风沙提前进入进沙口导致误差影响研究结果。集沙仪采集高度为 50cm，一共 25 个进沙口，进沙口规格为 2cm×2cm，每两个进沙口都是 2cm 高度差阶梯式分布。针对现场风况的不确定的情况，根据地表起沙的情况，风力状况来自由确定收集时间的长度。在收集沙物质的同时，用自动风速记录仪采集不同高度的风速数据。收集到的沙子用自封袋一层一层进行取样，然后带回实验室用天平测量重量。



图 2 集沙仪

Fig.2 Sand collector

3.2.4 风速廓线观测

风速观测采用 10 通道的 HOBO 小型数采仪配套三杯风速仪及风向标对各个下垫面的风速和风向进行观测，监测时将 HOBO 风速仪布设在不同下垫面样地中心区域，同时观测距地表地面高度依次为 10cm、30cm、50cm、100cm、200cm 共五个垂直高度的风速，并在 200cm 处设置风向标采集风向。观测时间内 HOBO 风速仪数据采集器自动记录观测时段内的自然风速和风向，测量间隔为 2min。



图3 HOBOWind速度数据采集仪器

Fig.3 HOBOWind speed data acquisition instrument

3.2.5 地表粗糙度计算

地表粗糙度是指平均风速等于0处距离地表的高度。在野外，确定三种不同下垫面的地表粗糙度 Z_0 是以风速按照对数规律分布为依据的^[33]，在实际测量的途中发现，同一个地方，经过反复测量和计算，得到地表粗糙度的结果也不一样。但是按照我们的认知上来说，地表粗糙度应该是一个具体的值，不会发生改变。可能是因为在实际测量的过程中，有许多要素影响我们测量地表粗糙度。在进行了长期对野外地表粗糙度的多次测量和对资料的整理分析之后发现，相同的数据，使用不同种类的方法得到的地表粗糙度也不一样。在对实测数据经过多次研究分析之后，最后得出，首先先对风速求平均值，然后对地表粗糙度进行计算^[34, 35]，这种方法求出的地表粗糙度是比较合理，准确并且科学的。

地表粗糙度的计算公式为：

$$\lg Z_0 = (\lg Z_2 - \lg Z_1 \times \mu_2 / \mu_1)$$

(1)

式中， Z_0 为地表粗糙度， μ_1 ， μ_2 分别为同一时刻两个不同高度的风速，在本研究 Z_1 、 Z_2 所对应的高度分为10cm、100cm。

3.3 数据的处理

在对调查所得的资料数据进行整理，汇总，运用Microsoft Excel 2010对样地调查结果进行整理。然后运用OriginPro2021绘制风速风玫瑰图和输沙通量。

4 结果与分析

4.1 研究区植被及下垫面特征分析

群落类型	I		II	III	合 计
植物建群种	柠条锦鸡儿	黑沙蒿	黑沙蒿	-	-
高度（m）	0.55~1.76	0.37~0.71	0.55~0.73	-	-
冠幅长轴（m）	0.77~4.12	0.31~1.16	0.74~1.48	-	-
冠幅短轴（m）	0.69~3.18	0.28~1.01	0.54~1.38	-	-
株数（株）	7~14	4~7	16~23	-	-
盖度（%）	30.81~44.42	13.26~19.38	19.37~27.52	-	-
重要值	21.43~44.82	9.21~20.96	24.85~47.20	-	-
经度	109.7136~109.7454		109.7454~109.7682	109.7682~109.7742	

纬度		40.1886~40.2121	40.2121~40.2349	40.2349~40.3053	-
立地类型		固定沙地	半固定沙地	流动沙地	-
河床宽度 (km)	Max	0.37	0.47	0.68	0.51
	Ave	0.25	0.28	0.52	0.35
	Min	0.17	0.16	0.36	0.23
河床长度 (km)		4.27	3.49	10.37	18.12
河床面积 (km ²)		0.99	0.97	5.37	7.33

表 2 研究区样方调查及下垫面特征表

Tab 2 Quadrat survey and underlying surface characteristics of the study area

通过近几年的风沙治理与植被恢复，保护工作。西柳沟孔兑的植被覆盖面积已经有了明显的扩大。特别是在风沙区，植物对于防风固沙起到至关重要的作用。

通过对研究区样方调查，对西柳沟孔兑风沙区河床东西两岸植被分布情况分析，根据植被盖度划分沙地类型为固定沙地，流动沙地和半固定沙地，根据重要值确定固定沙地植物群落为柠条锦鸡(*Caragana korshinskii* Kom.)+黑沙蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.)群落，半固定沙地植物群落为黑沙蒿群落。流动沙地无植被覆盖。

4.2 不同下垫面的风速特征

风向是塑造区域风沙地貌的重要动力条件，根据所测数据的绘图结果显示，西柳沟起沙风风向主要以 NW 和 WNW 为主，半固定沙地和固定沙地起沙风风向组成结构较为复杂。流动沙地均以偏西风(WNW、NW)为主，偏西风频率最大，分别为 31.58%和 60.53%。其次是偏北风(NNW)，频率为 7.89%。半固定沙地主要也是以偏西风(WNW、NW、W)为主，偏西风频率最大，分别为 25.74%、4.78%和 8.65%。次风向以偏南风(S、SSE、SE)为主，偏南风频率最大，分别为 22.32%，17.54%和 5%。固定沙地与半固定沙地风向类似，主要以偏南风(WNW、NW)为主，偏西风频率最大，分别为 37.69%和 14.62%。其次是偏南风(S、SSE、SE)，频率分别为 11.92%，9.61%，4.92%。总体来说西柳沟孔兑的起沙风主要以偏南风作为主风向，偏西风为次风向。少有来自东北方向和西南方向的起沙风。

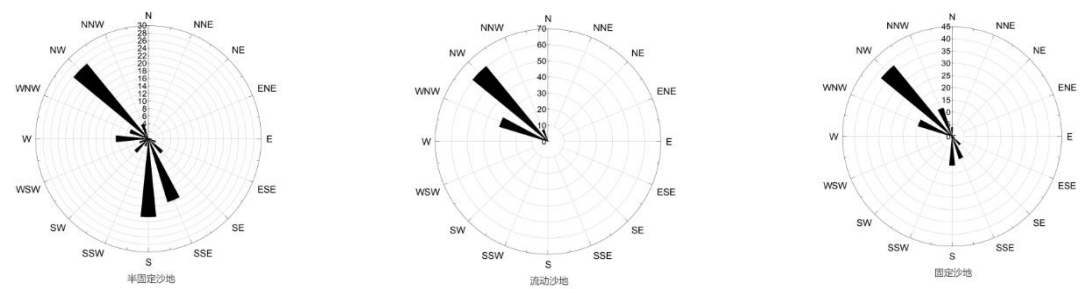


图 5 不同下垫面风玫瑰图

Fig.5 Different under the cushion wind rose diagram

4.3 风速廓线

研究区风速廓线反映了不同下垫面垂直风速的变化规律，分析西柳沟孔兑不同下垫面情况下的风速廓线图(图 6)可以得出,当距离地面高度从 200cm 下降到 10cm 时,流动沙地风速从 5.03m/s 下降到了 3.14m/s,平均风速下降幅度最小,地表土壤对风的侵蚀抵抗能力越小;在固定沙地上,风速廓线变化是最大的,当高度从 200cm 下降到 10cm 时,固定沙地风速从 4.36m/s 下降到了 0.52m/s,平均风速下降幅度最大,地表土壤对风的侵蚀抵抗能力越大。

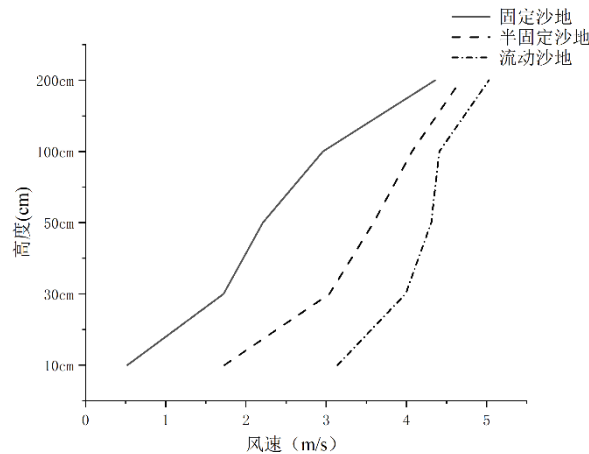


图 6 不同下垫面风速廓线图
Fig.6 Different underlying surface wind speed profile

4.4 地表空气动力学粗糙度

地表粗糙度数值越大,代表着近地表对风速的削弱作用越大,地表土壤的抗风蚀能力越强;土壤风蚀率越小,地表土壤的抗风蚀能力越强;随着土壤风蚀率的增大,地表粗糙度降低。因此,通过对三种不同下垫面地表粗糙度进行计算,可以研究不同地表粗糙度对风速廓线的影响程度。选取固定沙地,流动沙地和半固定沙地距离地表 10cm 和 100cm 处两个不同高度的风速,通过分析计算三种不同下垫面的地表粗糙度(见表 2)。通过表 2 可知,研究得到的固定沙地,在半固定沙地和流动沙地中,地表粗糙度呈现递减趋势,与实际的地表情况基本一致。固定沙地植被覆盖率较高,植物建群种高度普遍 50cm 以上,地表粗糙度固定沙地的最大,抗风蚀能力强,因而固定沙地土壤侵蚀率小。半固定沙地植物建群种的平均高度在 50cm 到 70cm 之间,其地表粗糙度较固定沙地的低,地表土壤对风的侵蚀抵抗的能力也较弱一些;流动沙地无任何植物建群种,土壤完全裸露,地表粗糙度最小,土壤风蚀率最大,土壤对风的侵蚀抵抗的能力最弱。

不同地表	10cm 高风 速(m/s)	100cm 高风 速(m/s)	风速比 A
固定沙地	0.52	2.96	5.69
半固定沙地	1.73	4.07	2.35
流动沙地	3.14	4.41	1.4

表 2 不同下垫面地表粗糙度
Tab 2 Surface roughness of different underlying surfaces

4.5 输沙率

植被覆盖度的不同对沙地的风沙分布和运动规律有着很大的影响,在相近的风速条件下,流动沙地和固定沙地输沙率都随着高度呈现幂函数分布(见图 7),其中流动沙地拟合曲线斜率较大,表示流动沙地的输

沙率变化比较大；半固定沙地的输沙率随高度呈现对数函数分布(见图 7)。

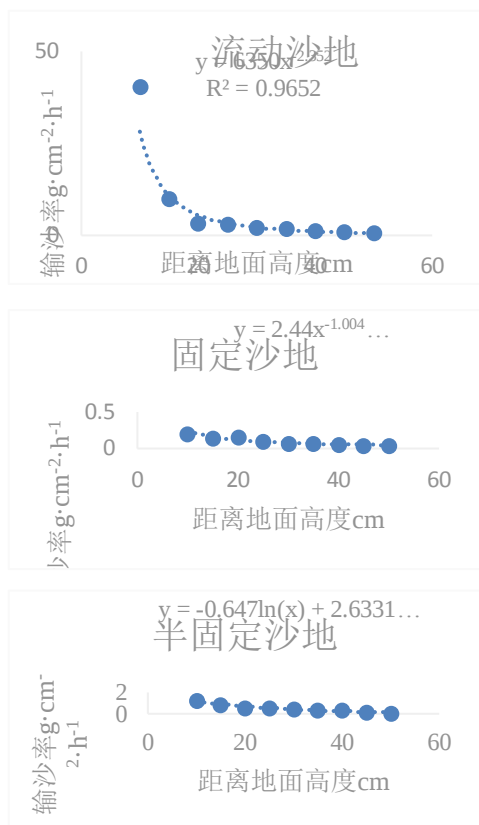


图 7 不同下垫面输沙率散点图

Fig.7 Scatter plot of sand transport rate of different underlying surfaces

风速条件相近的情况下，分析输沙率随高度变化关系的柱状图，在距离地表 0~10cm 处，随着高度的增加输沙率会呈现出一个波动增加的趋势，距离地表的高度大于 10cm 以后，随着距离地表高度的增加，输沙率呈现减少的趋势，其中距离地表 10~20cm 范围内，流动沙地的输沙率大幅减少。在距离地表 50cm 以内，流动沙地有百分之 80%的输沙量处于距离地表 0~10cm 高度处，90%的输沙量则是集中在 0~20cm 范围内。半固定沙地输沙量集中分布在距离地表 0~20cm 处，与流动沙地相比 0~10cm 高度输沙率减少速率比较缓慢，输沙量降低趋势比较平稳。固定沙地在整个的距离地表 0~50cm 范围内输沙量很少，但整体也是遵循输沙率随高度增大而减少的。

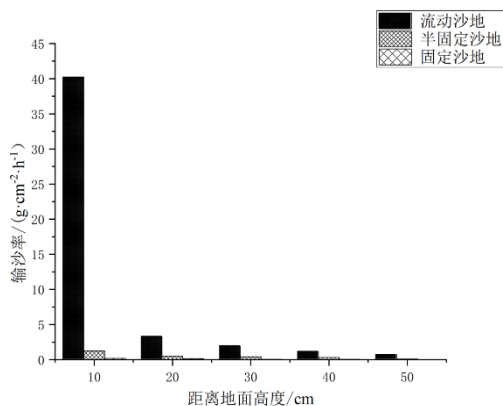


图 8 不同下垫面输沙率柱状图

Fig.8 Histogram of sand transport rate of different underlying surfaces

5 讨论与结论

(1)研究区下垫面风特性

在研究过程中发现,风向和风速是影响风沙侵蚀的主导因素,这与罗凤敏^[36]等人对乌兰布和沙漠起沙风的研究结论一致。通过综合对比秋冬季节不同月份风速风向数据发现,虽然研究区秋冬季节盛行风为西南风,出现频次较多,但有效起沙风速较低,无法构成风沙流运动,而真正造成风沙侵蚀主要动力为风向频次出现并不多的西北风,风速 $\geq 5\text{m/s}$ 累积时间最长,造成了风沙侵蚀沉积,这与许炯心^[37]等人研究结果相悖,许炯心等人指出各风向风沙入河量与各风向出现频率之间存在较强正相关关系,而造成这种结果的原因主要是研究时间尺度不同,许炯心等人选择沙尘暴频发且降水量较大的时期,时间主要集中于春夏季。由于季节不同,导致风速风向之间存在差异。当然影响风沙运动的因素还有很多,在今后的研究中会综合对比多种因素进行分析。

(2)研究区输沙量特征

在西柳沟孔兑风沙区,人工种植的柠条锦鸡儿固沙林起到了防风固沙效能,减少风沙侵蚀。调查过程中发现流动沙地的输沙量远大于固定沙地和半固定沙地,而半固定沙地的输沙量又大于固定沙地。这与赵永来^[38]等人对植物覆盖地表抗风蚀性能的研究结论一致。造成这种情况的主要原因是人工种植的植物对近地面风速具有削减作用,在一定程度上对地表起沙具有阻碍作用。因此在孔兑风沙的治理过程中应注重沙区植物群落的保护,以减小风沙区的风沙侵蚀量。

6 结论

本文选取了十大孔兑其中之一的西柳沟孔兑作为研究对象,根据该地区的植被覆盖度进行分析划分该地区的风沙环境,并且对该地区的风况和输沙率进行研究,得出了以下结论:

(1)西柳沟孔兑风沙区下垫面沙地类型复杂,可划分为流动沙地、固定沙地和半固定沙地。其中流动沙地河床面积、长度和宽度均高于固定和半固定沙地,导致西柳沟流域存在严重生态安全隐患。

(2)西柳沟孔兑主要以偏南风为主风向,偏西风为次风向,通过近地表风速的风速廓线图和不同下垫面粗糙度,反映出近地表风速随着距离地表高度的增加呈现递增趋势。同时,地表粗糙度对近地面风速具有一定的削减作用。

(3)在风速条件相近的情况下,西柳沟孔兑输沙率与近地面高度和下垫面的地表粗糙度有着一定的关系,处在相同的下垫面类型中,随着距离地表高度增加,输沙率呈现减少的趋势。处在不同下垫面时,由于地表粗糙度不同,处在相同地表高度的输沙率也不相同,也呈现减少的趋势,表明地表粗糙度对于沙粒的运动有着一定的阻碍作用

参 考 文 献

- 1 赵媛媛,高广磊,秦树高,于明含,丁国栋.荒漠化监测与评价指标研究进展[J].干旱区资源与环境,2019,33(05):81-87.
- 2 潘玉豪,陈云皓,张旭晨等.宁夏土地荒漠化敏感度时空变化分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(04):582-590.
- 3 孙技星,钟成,何宏伟,努热曼古丽·托乎提,李卉.2000—2015 年中国土地荒漠化连续遥感监测及其变化[J].东北林业大学学报,2021,49(03):87-92.
- 4 Su B,Huang J,Fischer T,et al.Drought losses in China might double between the 1.5 C and 2.0 C warming[J].Proceedings of the National Academy of Sciences,2018,115(42):10600-10605.
- 5 Liu S,Zhang J,Zhang J,et al.Assessing Controversial Desertification Prevention Policies in Ecologically Fragile and Deeply Impoverished Areas:A Case Study of Marginal Parts of the Taklimakan Desert,China[J].Land,2021,10(6):641.
- 6 胡丽丽,郑文娇.中国的沙漠治理奇迹[J].生态经济,2020,36(07):9-12.
- 7 吴小爽,马志瑾.西柳沟历年洪水水沙变化分析[J].内蒙古水利,2021,No.231(11):18-19.
- 8 冉大川,张栋,焦鹏,姚文艺,倪用鑫.西柳沟流域近期水沙变化归因分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(05):143-149
- 9 刘通,黄河清,邵明安,刘高焕,杨永智.气候变化与人类活动对鄂尔多斯地区西柳沟流域入黄水沙过程的影响[J].水土保持学报,2015,29(02):17-22.
- 10 Vaezi A R,Ahmadi M, Cerda A.Contribution of raindrop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls[J].Science of the Total Environment,2017,583:382-392.
- 11 Das B,Paul A,Bordoloi R,et al.Soil erosion risk assessment of hilly terrain through integrated approach of RUSLE and geospatial technology:a case study of Tirap District, Arunachal Pradesh[J].Modeling Earth Systems & Environment,2018,4(1):373-381.
- 12 Tuo D,Xu M,Gao G.Relative contributions of wind and water erosion to total soil loss and its effect on soil properties in sloping croplands of the Chinese Loess Plateau[J].Science of the Total Environment,2018,633:1032-1040.
- 13 Du H,Dou S,Deng X,et al.Assessment of wind and water erosion risk in the watershed of the Ningxia-Inner Mongolia Reach of the Yellow River, China[J].Ecological Indicators,2016,67:117-131.
- 14 肖培青,姚文艺,刘希胜,申震洲.植被固土减蚀作用的力学效应[J].水土保持学报,2013,27(03):59-62.
- 15 王文君,陈新闻,郭建英等.砒砂岩区土壤侵蚀时空分布特征及预测模拟[J].内蒙古林业科技,2018,44(04):1-6.
- 16 张元,秦富仓,周佳宁等.基于 USLE 的内蒙古达拉特旗黄土丘陵区土壤侵蚀研究[J].内蒙古水利,2016,No.165(05):6-7.
- 17 姚海芳,师长兴,邵文伟,白建斌.基于 SWAT 的内蒙古西柳沟孔兑径流模拟研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(06):139-144.
- 18 王略,屈创,赵国栋.基于中国土壤流失方程模型的区域土壤侵蚀定量评价[J].水土保持通报,2018,38(01):122-125+130.
- 19 周夏飞,马国霞,曹国志,於方,周颖,贾倩,张宇航.基于 USLE 模型的 2001—2015 年江西省土壤侵蚀变化研究[J].水土保持通报,2018,38(01):8-11+17+2.
- 20 严国民,王晓.浅谈内蒙古十大孔兑水土保持生态环境建设[J].水土保持学报,2001,(S1):119-121.
- 21 李旭.内蒙古生态环境恶化对黄河的危害及治理对策[J].中国水土保持,2006,(02):12-14.
- 22 张建,马翠丽,雷鸣,陈松伟.内蒙古十大孔兑水沙特性及治理措施研究[J].人民黄河,2013,35(10):72-74+77.
- 23 郭彦,侯素珍,王平,胡恬.基于集对分析的西柳沟河床质球形度相似性研究[A].河海大学、中国水利学会.探索“智慧水利”推动科技创新——2017(第五届)中国水利信息化技术论坛论文集[C].河海大学、中国水利学会:北京沃特咨询有限公司,2017:170-174.
- 24 王文君,陈新闻,李小倩等.十大孔兑降雨侵蚀产沙时空分布特征及预测[J].人民黄河,2019,41(04):1-6+10.
- 25 许炯心.黄河内蒙古段支流“十大孔兑”侵蚀产沙的时空变化及其成因[J].中国沙漠,2014,34(06):1641-1649.
- 26 孙宝洋,李占斌,张洋等.黄河内蒙古支流“十大孔兑”区风蚀强度时空变化特征[J].农业工程学报,2016,32(17):112-119.
- 27 姚海芳,师长兴,顾珍逵.气候变化和人类活动对黄河上游十大孔兑水沙过程的影响[J].干旱区地理,2018,41(03):472-479.
- 28 赵振亚.基于 RS 和 GIS 黄河内蒙古段十大孔兑综合治理评价研究[D].内蒙古农业大学,2015.
- 29 王平,田勇,侯素珍等.黄河内蒙古段孔兑水沙特点分析[J].人民黄河,2012,34(11):39-42.

- 30 郭彦,侯素珍,林秀芝.近 51 年西柳沟流域水沙变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(10):176-183.
- 31 孙爱文,张荣旺,马广铭等.鄂尔多斯高原十大孔兑洪水泥沙分析[J].内蒙古科技与经济,2002(01):69-70.
- 32 刘韬,张士锋,刘苏峡.十大孔兑暴雨洪水产输沙关系初探——以西柳沟为例[J].水资源与水工程学报,2007,No.73(03):18-21.
- 33 刘小平,董治宝.空气动力学粗糙度的物理与实践意义[J].中国沙漠,2003(04):3-12.
- 34 段云.典型风蚀地况近地表风廓特性的风洞模拟研究[D].内蒙古农业大学,2006.
- 35 杨明元.地表粗糙度计算方法的分析与研究[J].干旱区资源与环境,1996(04):55-57.
- 36 罗凤敏,高君亮,辛智鸣,边凯,郝玉光,刘芳.乌兰布和沙漠东北缘起沙风风况及输沙特征[J].农业工程学报,2019,35(04):145-152.
- 37 许炯心.“十大孔兑”侵蚀产沙与风水两相作用及高含沙水流的关系[J].泥沙研究,2013(06):28-37.
- 38 赵永来,陈智,孙悦超,王荣莲.植被覆盖地表抗风蚀性能的测试与研究[J].农机化研究,2010,32(07):1-4+16.