

潘加朋,张克存,安志山,等.风沙治理工程综合效益分析——以敦煌黑山嘴风沙口为例[J].中国沙漠,2023,43(2):233-242.

风沙治理工程综合效益分析 ——以敦煌黑山嘴风沙口为例

潘加朋^{1,2}, 张克存¹, 安志山¹, 张宏雪^{1,2}, 薛承杰^{1,2}

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 敦煌戈壁荒漠生态与环境研究站/沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:通过对敦煌黑山嘴风沙工程治理区和未治理区近地表风动力环境与土壤理化性质对比分析,研究了风沙治理工程下黑山嘴的防风固沙与土壤改良的综合效益,为今后该区域近地表风沙动力过程的深入研究和风沙灾害综合治理提供了借鉴。结果表明:相较于未治理区,敦煌黑山嘴工程治理区的平均风速、起沙风频率均明显降低,输沙强度减小,年输沙势降低85%,大风天气减少;工程治理区土壤各养分及水盐含量也在一定深度明显增加,全氮、全磷、全钾含量在5 cm土层深度增长率分别达到了322.5%、49.3%、15.1%,全氮、易溶盐对其他组分影响增大,土壤肥力显著提升;两区域土壤电导率与易溶盐含量变化趋势相同,但工程治理区两者含量在土壤表层明显增加,应警惕发生地表盐渍化。

关键词:风沙治理工程; 敦煌; 起沙风; 输沙势; 土壤理化性质

文章编号: 1000-694X(2023)02-233-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00145

中图分类号: X43

文献标志码: A

0 引言

风沙灾害一般指由风沙运动导致,以风蚀、风积、沙埋等表现形式为主,对作物、植被、生态环境等造成严重危害的现象^[1-2]。近年来,伴随着全球气候变化及人类对水土资源的不合理利用,中国的风沙灾害已日趋严重,对当地的生存环境与社会经济发展造成了严重的影响^[3-6]。特别是在中国的西北地区,风沙灾害引起的植被退化、水资源短缺、作物减产、交通安全等一系列问题日益凸显,严重危害当地人民的生存与生产。因此,实施有效的风沙治理工程措施刻不容缓^[7-10]。随着近些年相关研究的深入,各地实施了大量的风沙治理工程,取得了显著的成效,对风沙灾害严重的地区进行综合治理和效益评价已成为当前研究的热点^[11-12]。

受风沙严重危害地区的综合治理主要是通过对其当地进行实地调查,判断其风沙危害类型及程度,从而因地制宜地采取多种工程措施相结合的方法进行综合治理^[13]。由于综合治理成效显著,许多

学者对研究区生态系统结构、土地利用变化、土壤风蚀状况等方面进行了详尽的评估,并深入研究了综合防治方案、工程措施选择以及防治后的生态效益评价^[14-15]。但到目前为止,对风沙综合治理工程进行完整的综合效益对比分析相对较少。以往的研究主要针对风沙综合治理工程的具体措施及单一的效益进行评价,缺少代表性,不能全面地体现治理工程的综合效益。基于此,本文通过对敦煌沙漠外围工程治理区及其边缘的未治理区的防风固沙、土壤改良综合效益进行对比分析,旨在为该区域风沙灾害防治提供基础数据与技术支持,同时为风沙治理工程的综合效益对比分析提供借鉴,完善风沙防护工程效益评价模式。

1 研究方法

1.1 研究区概况

敦煌位于中国西北部地区,地处河西走廊的最

收稿日期:2022-10-12; 改回日期:2022-12-12

资助项目:国家重点研发计划项目(2020YFA0608403-1);国家自然科学基金项目(42171083,41871016)

作者简介:潘加朋(1999—),男,山西忻州人,硕士研究生,主要从事风沙灾害与防沙工程研究。E-mail: panjiapeng@nieer.ac.cn

通信作者:张克存(E-mail: kecunzh@lzb.ac.cn)

西端。属典型的大陆性干旱气候区,气候干旱少雨,日照时间长、蒸发量大,昼夜温差大,夏季炎热、冬季寒冷。年均降水量不足 40 mm,一般集中在 6—8 月,约占全年总量的 62%,年均蒸发量高达 2 488 mm。境内大风和沙尘天气频繁,常年以东风与西北风为主,4—9 月东风与东北风为主导风向,其余各月以西风与西北风为主,大风天气频繁,全年出现 15~20 次 8 级以上大风天气,风力最高可达 11 级。研究区内主要植物有梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、红柳(*Tamarix chinensis*)等。

本文选择敦煌绿洲西侧的黑山嘴风沙口综合治理区(40°04′6.3341″N、94°35′4.1857″E,图 1)及

其边缘流沙地作为本次研究的试验区。黑山嘴风沙口综合治理区地表以流沙为主,地下水埋深丰水期为 8.26 m,枯水期为 9.94 m^[16]。自 2014 年起,在该区设置了高密度聚乙烯(HDPE)半隐蔽式沙障、阻沙栅栏并种植了大量的人工植被。在区域以北设置 6 道 60 cm 高度的阻沙栅栏,中间空白带宽 18.0 m 并在其中种植骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*),南侧流动沙丘设置 HDPE 半隐蔽式沙障并在中部平坦流沙地种植梭梭。研究区域植被类型以人工种植的梭梭为主,其初始种植株行距为 3 m×4 m,在栽植当年和第二年采用人工灌溉的方式浇灌两次,之后依靠天然降水。天然植被有白刺、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)等,但数量相对较少。

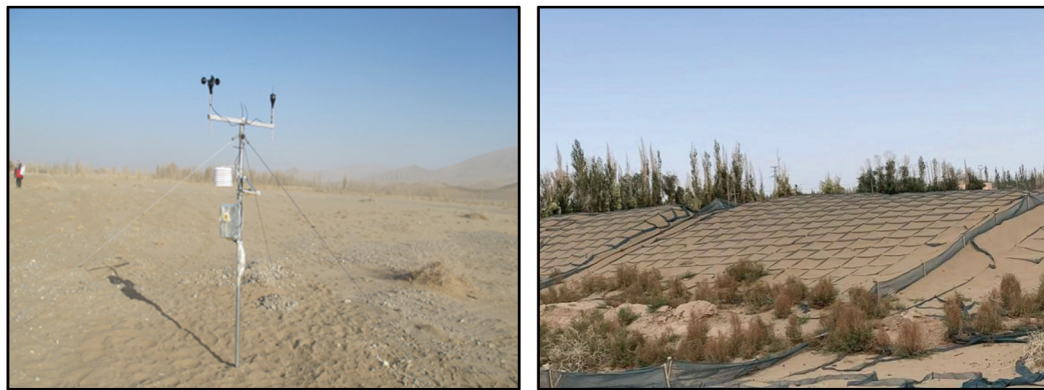


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the studied area

1.2 研究方法

1.2.1 风况数据测定及计算方法

在黑山嘴风沙口综合治理区及其边缘流沙地内布设了 HOBO 公司所生产的便携式气象站,用于观测黑山嘴治理区、未治理区的气温、湿度、降水量、风速与风向等气象数据。便携式气象站架设在距地面 2.0 m 的高度,数据采集间隔为 10 min。输沙势(drift potential,简称 DP)表示潜在最大输沙量,是判断研究区一定时间内风沙活动强度的一个重要指标^[17-19]。本文通过 Fryberger^[20]提出的公式进行计算:

$$DP = V^2(V - V_c)t$$

式中:DP 为输沙势,单位为 VU;V 为 2 m 高度起沙风速; V_c 为起沙风速临界值;t 为起沙风持续时间,一般采用频率进行计算。通过对该区域的研究与相关地表研究区的分析,为保证实验结果真实可

靠,本文将临界起沙风风速定为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[21-22]。

1.2.2 土壤理化性质测定方法

分别对黑山嘴风沙口综合治理区不同区域的土壤进行取样,黑山嘴工程治理区的取样点位于 HDPE 半隐蔽沙障之间,周边骆驼刺长势良好,流沙区取样点为治理区边缘流沙地,地表无植被覆盖。分别采集 2、5、10、20、40 cm 深度土壤,测定 N、P、K、有机质、含水量等,揭示风沙治理工程区与未治理区土壤理化性质的差异。

土壤理化主要指标的具体测定方法为:含水量采用烘干法进行测定;易溶盐含量采用水液平衡法测定;有机质采用重铬酸钾氧化-滴定法测定;全氮采用浓硫酸氧化-凯氏定氮法测定;全磷采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定;全钾采用氢氧化钠碱熔-原子吸收分光光度法测定;有效磷采用碳酸氢钠浸提比色法测定;水解性氮采用碱解-扩散法

测定;速效磷采用乙酸浸提-原子吸收分光光度法测定。

2 结果与分析

2.1 防风固沙效益

2.1.1 平均风速

黑山嘴工程治理区与未治理区在同一时段内季节与月平均风速差异较为明显,未治理区季节与月平均风速均大于工程治理区,但其变化趋势大致相同(图2)。1—6月,未治理区月平均风速逐渐增

加,在6月达到最大值 $3.83 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,之后风速明显减小,在8月与11月略有增加,随后在1月达到最小值 $2.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;工程治理区的月平均风速在1—6月同样呈现递增的趋势,但在5月略有减小,6月达到最大值 $2.31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,随后风速呈持续下降趋势,在8月与12月稍有增加,但变化幅度均不超过 $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,随后在1月达到最小值 $1.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。与未治理区相比,工程治理区人工植被的种植大大削弱了风速,两者最大风速差达到了 $1.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。与月平均风速相类似,工程治理区各季节平均风速均小于未治理区,差异明显。秋季两者风速差已达到了 $1.42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

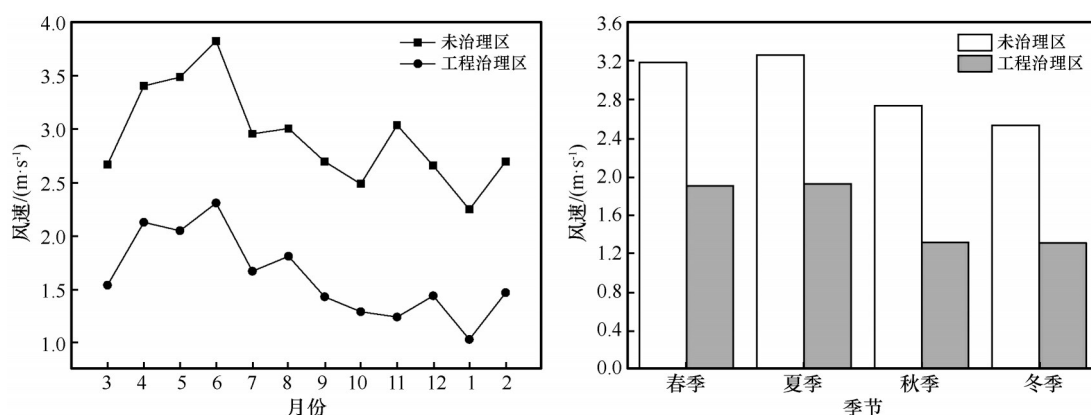


图2 黑山嘴季节及月平均风速

Fig.2 Seasonal and monthly mean wind speeds in Heishanzui

2.1.2 起沙风

起沙风直接决定了风沙运移能力的大小,对评判一个区域的风况起着举足轻重的作用。黑山嘴未治理区全年起沙风达10 633次,起沙风频率高达21.30%;工程治理区全年起沙风为2 555次,起沙风频率不到未治理区的1/4,仅为5.13%(图3)。未治理区全年起沙风以NE、SE为主,分别占全年起沙风总数的11.81%和14.61%,其余主要风向起沙风差异不大;工程治理区全年起沙风以NE、SW、WSW、SE、SSE为主,分别占全年起沙风总数的17.81%、16.87%、17.14%、12.05%与13.74%,这些风向的起沙风占到了工程治理区全年起沙风75%以上。与未治理区相比,由于植被种植以及沙障的铺设,工程治理区全年 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的起沙风频率大大降低,在NE、SE方向 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的起沙风几乎为0,其余各风向风速较大的起沙风频率也均明显减小。

从起沙风频率季节分布来看,工程治理区与未治理区的起沙风均方向多变且起沙风频率差异较

大。未治理区春、夏季主导风向均以NE为主,起沙风频率分别为3.93%和3.77%,除NE外,春季SE风向的起沙风频率与夏季NNE、WSW风向频率也较高,分别为5.39%、3.31%和3.58%,秋季与冬季起沙风分别以ENE与SE为主,为4.46%与4.38%。由此可见,未治理区秋冬两季风向单一,起沙风频率低,风沙活动强度小且集中在春夏两季。工程治理区春季起沙风风向多变,主导风向为NE、SE、SSE与WSW,起沙风频率分别为1.14%、1.26%、0.99%和1.06%,夏季、冬季主导风向分别为NE、SW,起沙风频率分别为1.95%与1.51%,秋季则以SE和SSE为主,起沙风频率分别为0.47%和0.45%。与春季相比,夏、秋、冬季风向单一,起沙风主要集中在春季。相较于未治理区,工程治理区四季的风向发生了很大的改变:主导风向的频率甚至出现2倍以上的减小,起沙风频次明显减少。在进行综合治理后,工程治理区的大风天气明显减少,风沙灾害得到了一定的控制。

A: 黑山嘴未治理区

B: 黑山嘴工程治理区

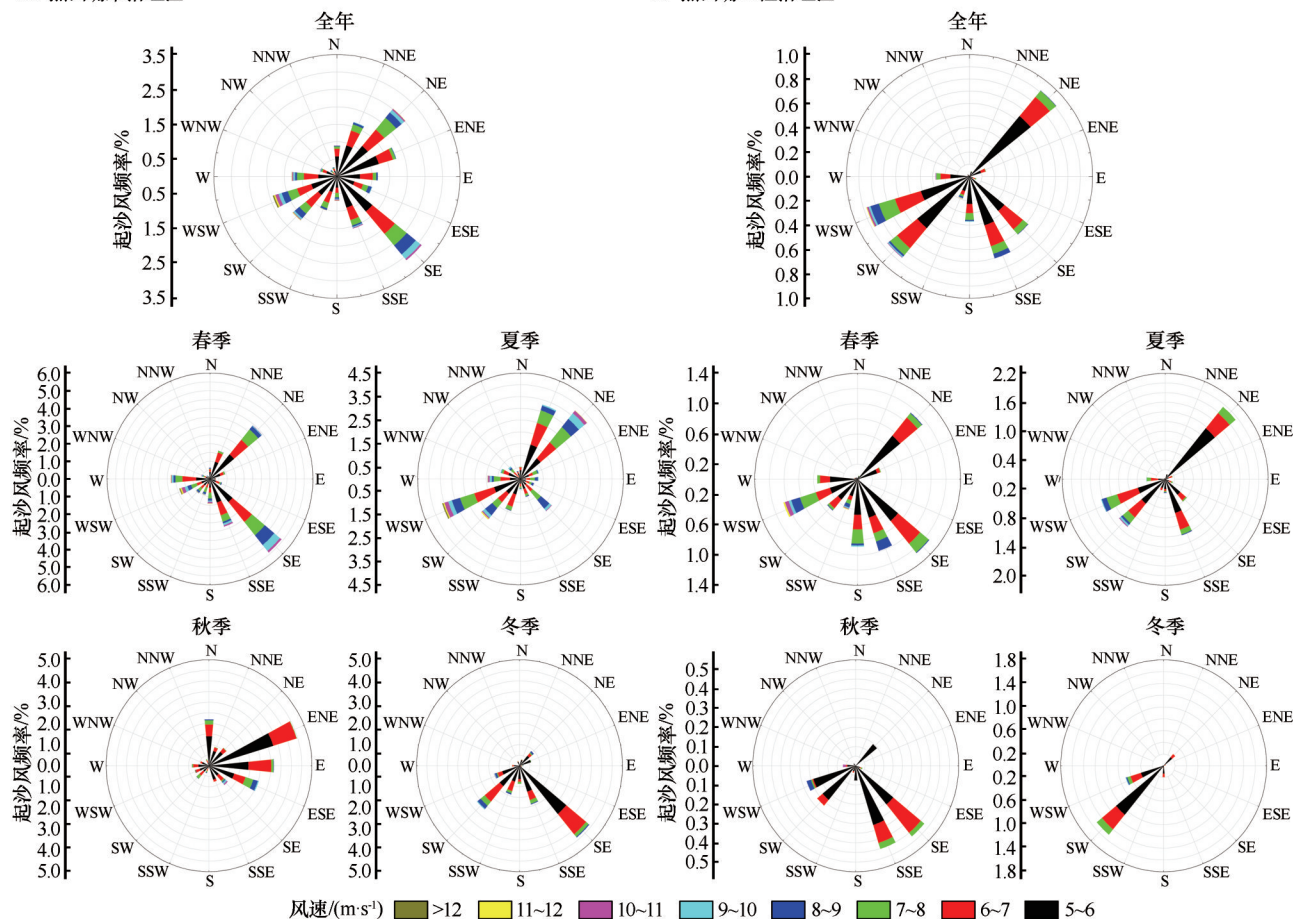


图3 黑山嘴起沙风玫瑰

Fig.3 Rose of sand-driving wind in Heishanzui

2.1.3 输沙势

依据风能环境标准^[17],黑山嘴未治理区与工程治理区均属于低风能环境,其年输沙势分别为129.39 VU和20.06 VU,均小于200 VU(图4)。未治理区风向变率为0.24,属于小比率,这表明未治理区年输沙势方向多变,年输沙势在NE、SE与WSW方向上较大,占到了全年输沙势的47.42%,近乎全年输沙势的一半,年合成输沙势方向及大小分别为322.90°、31.59 VU;工程治理区风向变率为0.44,属于中比率,年输沙势主要在WSW方向,年合成输沙势方向及大小分别为0.46°、8.78 VU。工程治理区的输沙强度明显降低,其年输沙势相较于未治理区降低了近85%。

从输沙势季节分布来看,未治理区夏季输沙势最高,为50.7 VU,秋冬两季输沙势较小,均不足20 VU;工程治理区春季输沙势最高,但仅有9.26 VU,比未治理区四季的最低输沙势还要低1.23 VU,秋季工程治理区输沙势最小,为1.32 VU。未治理区

四季风向变率基本上都属于小比率,输沙势方向多变,输沙环境较为复杂,其春、夏、秋季主要输沙方向为E—SSE,而冬季N—ENE方向的输沙势明显降低,主要输沙方向也偏转到S—SSW;工程治理区春、秋季的主要输沙方向为SSE—SSW,冬季主要输沙方向为SSW—SW,偏转幅度较小。相较于未治理区,工程治理区输沙情况随季节变化较小,但依然存在季节性波动,主要受到春季SW方向风沙的威胁。为了更详细地说明工程治理区与未治理区的风沙活动强度,利用三维激光扫描数仪定期监测近地表风沙侵蚀动态变化,结果表明工程治理区年均风沙堆积厚度为0.12 m,未治理区仅为0.03 m,可见工程治理措施对流沙的固定和阻截作用较为显著。

2.2 土壤改良效益

2.2.1 土壤养分垂直分布

土壤养分的垂直分布可以直观地反映土壤养

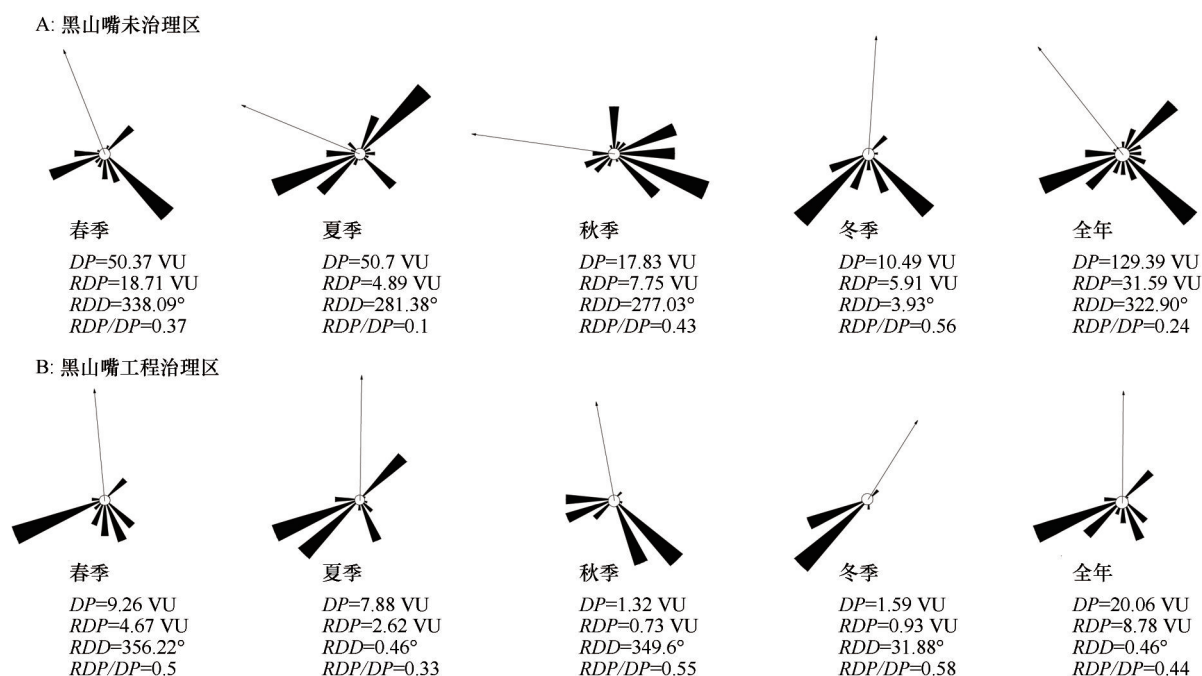


图4 黑山嘴输沙势玫瑰

Fig.4 Rose of drift potential in the Heishanzui

分含量随深度的变化情况,对理解区域土壤理化性质有着重要的意义。从土壤养分的垂直分布可以看出(图5),除pH在黑山嘴未治理区与工程治理区各深度无明显差异外,其余土壤养分均在不同深度差异明显。黑山嘴工程治理区土壤中的全氮、全磷、全钾、水解性氮、有效磷、速效钾含量均在5 cm土层深度迅速增加,分别为 $0.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $14.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $50.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $9.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $546.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与同深度未治理区相比分别增加了322.5%、49.3%、15.1%、195.9%、255.5%、442.0%,随后明显降低;有机质含量则在10 cm土层深度与未治理区差异明显,大了281.1%,随后迅速下降,差异减小。黑山嘴试验区土壤养分含量的垂直分布差异均表现为在某一深度明显增大后迅速减小。这主要由于工程治理区种植的大量人工植被使得土壤中全氮、全磷、有机质等土壤养分的含量迅速增加,在一定深度相较于未治理区明显上升,但土壤中的全氮、全磷、有机质等土壤养分主要来源于植物根分泌物以及其凋落物的分解^[23-24],而植物的凋落物等主要在表层土壤,只有少部分会随雨水等渗透到下层土壤,使得工程治理区土壤养分呈现出先增加后下降的趋势,从而使表层土壤的土壤养分含量大于深层土壤,呈现“肥岛效应”^[25-26]。

同时,黑山嘴土壤的水盐含量也随土层深度变

化出现了明显的差异。黑山嘴工程治理区土壤含水量在地表和10 cm土层深度与未治理区差异较大,工程治理区地表土壤含水量达到了 $22.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而未治理区仅有 $1.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,10 cm土层深度工程治理区土壤含水量达到了 $43.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,远高于未治理区的 $0.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。黑山嘴工程治理区人工植被的种植使得其水盐含量随土层深度的变化发生了明显的分异,在一定深度由于植物根系对水分与其对易溶盐类迁移的影响,相较于同深度的未治理区,工程治理区水盐含量均出现明显上升,但随着深度的增加,植物根系难以影响,两区域间的差异减小,水盐含量变化大致趋同。

2.2.2 土壤养分来源

通过对黑山嘴工程治理区与未治理区的土壤养分进行相关分析,可以大致了解土壤养分的变化情况、相互影响,从而判断工程治理区土壤养分具体来源。在未治理区(表1),土壤含水量与全磷正相关性极显著($P < 0.01$),相关系数为0.987,与水解性氮、有效磷具有一定的正相关性($P < 0.05$);同时,有效磷与pH值具有一定的负相关性($P < 0.05$),与全氮、全磷具有一定的正相关性($P < 0.05$),pH值也与全氮有一定的负相关性($P < 0.05$)。而在工程治理区,土壤中易溶盐含量与全氮、有效磷、速效钾正相关性极显著($P < 0.01$),相关系数分别为0.992、

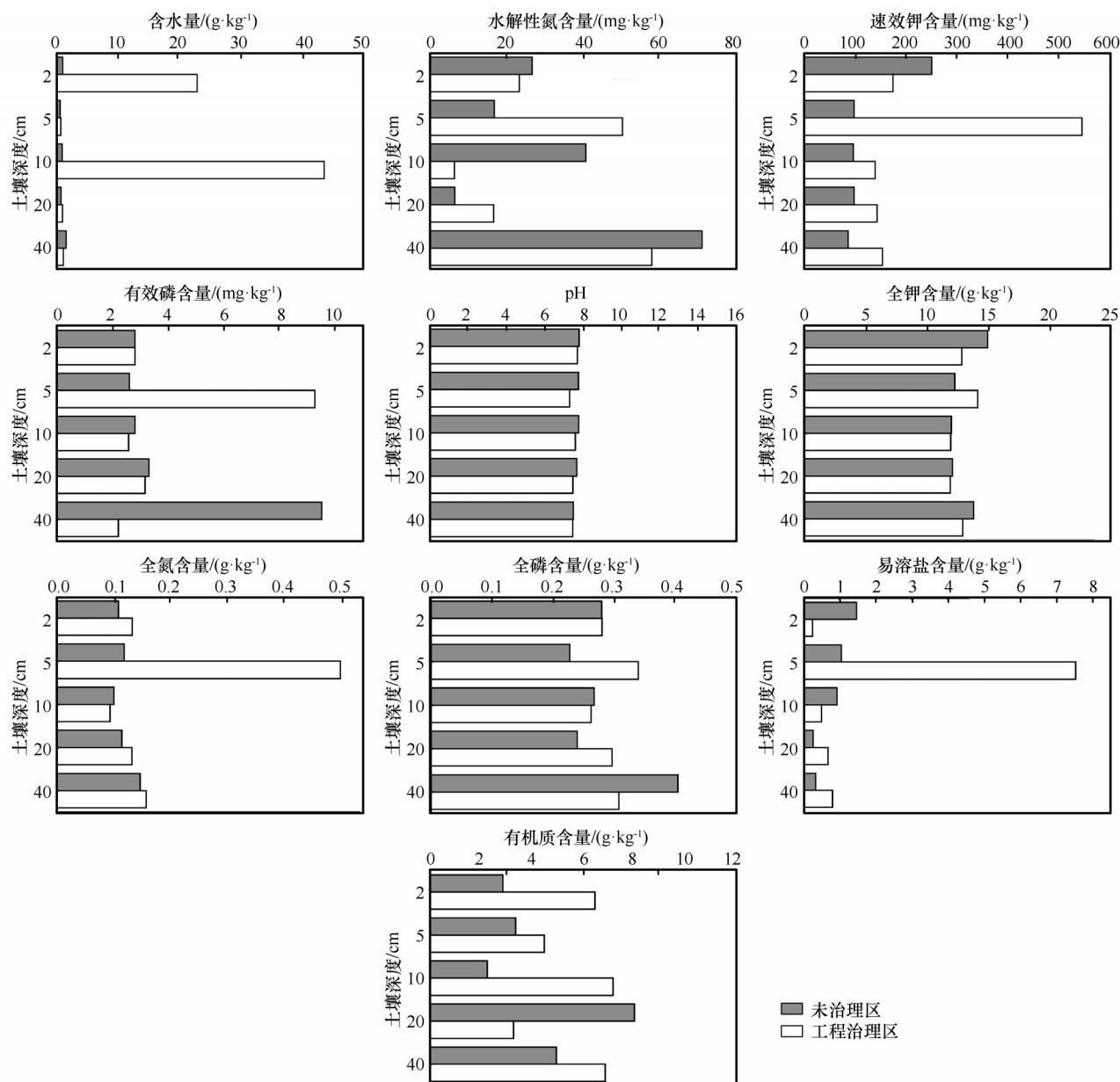


图5 黑山嘴土壤养分垂直变化

Fig.5 Vertical variation of soil nutrients in Heishanzui

0.988、0.992;全氮与有效磷、速效钾正相关显著($P < 0.01$),与全磷、全钾具有一定的正相关性($P < 0.05$),此外,pH值与全磷也具有一定的相关性($P < 0.05$)。综上分析,黑山嘴工程治理区种植的梭梭与骆驼刺对土壤中的全氮、易溶盐与其他土壤养分间的相关性影响较大。在经过治理后,由于梭梭、骆驼刺的根系分泌物及凋落物是氮元素的主要来源且能对易溶盐的迁移造成较大的影响,从而使得工程治理区相较于未治理区土壤养分中易溶盐与全氮对其他组分的影响明显上升,而土壤全氮与易溶盐含量为判定土壤肥力的主要指标之一,这表明黑山嘴工

程治理有助于土壤肥力的显著提高。

2.2.3 土壤电导率变化特征

土壤电导率一般是指土壤溶液的导电能力,而土壤溶液导电能力的强弱与土壤中盐类的离子量息息相关,所以在一定程度上对土壤电导率的测定可以反映出土壤的盐分含量,两者间的相关性较高。通过对黑山嘴土壤电导率、土壤易溶盐含量的测定可以发现,两者在工程治理区与未治理区的变化趋势几乎相同(图6)。相较于未治理区,黑山嘴工程治理区土壤易溶盐含量在5 cm土层深度差异明显,其含量达到 $7.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,增长了617.1%,其余

表 1 黑山嘴土壤养分间相关性
Table 1 Correlation among various soil fractions in Heishanzui

样地类型	组分	含水量	pH	易溶盐含量	有机质	全氮	全磷	全钾	水解性氮	有效磷	速效钾
黑山嘴未治理区	含水量	1									
	pH	-0.759	1								
	易溶盐含量	-0.314	0.789	1							
	有机质	-0.037	-0.504	-0.794	1						
	全氮	0.690	-0.918*	-0.561	0.334	1					
	全磷	0.987**	-0.825	-0.364	0.011	0.794	1				
	全钾	0.527	-0.121	0.423	-0.247	0.275	0.504	1			
	水解性氮	0.933*	-0.660	-0.220	-0.281	0.631	0.929*	0.355	1		
	有效磷	0.897*	-0.953*	-0.584	0.237	0.924*	0.950*	0.316	0.837	1	
	速效钾	-0.034	0.481	0.752	-0.344	-0.352	-0.105	0.784	-0.192	-0.331	1
黑山嘴工程治理区	含水量	1									
	pH	0.721	1								
	易溶盐含量	-0.422	-0.807	1							
	有机质	0.641	0.558	-0.401	1						
	全氮	-0.491	-0.800	0.992**	-0.403	1					
	全磷	-0.836	-0.896*	0.836	-0.516	0.879*	1				
	全钾	-0.467	-0.586	0.842	-0.093	0.892*	0.822	1			
	水解性氮	-0.714	-0.638	0.518	0.004	0.590	0.809	0.771	1		
	有效磷	-0.392	-0.753	0.988**	-0.474	0.980**	0.797	0.807	0.417	1	
	速效钾	-0.389	-0.735	0.992**	-0.368	0.992**	0.814	0.878*	0.507	0.990**	1

**表示 $P<0.01$ 水平下显著相关,*表示 $P<0.05$ 水平下显著相关。

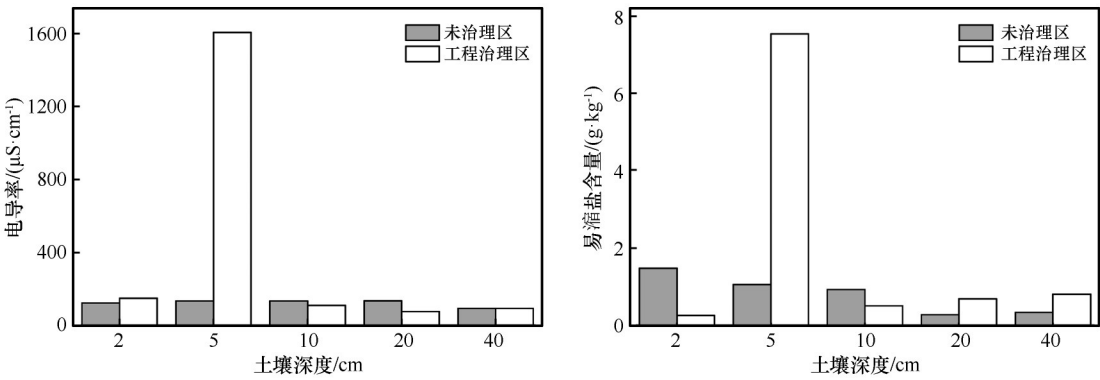


图 6 黑山嘴土壤电导率与土壤易溶盐含量变化
Fig. 6 Change of soil conductivity and soil soluble salt content in Heishanzui

深度差异较小,变化趋势不明显;土壤电导率变化趋势与其几乎相同,在 5 cm 土层深度与未治理区差异明显,为 1 603.0 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,而同深度未治理区土壤电导率仅为 133.1 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

总体来看,黑山嘴土壤易溶盐含量与土壤电导

率相关性较好,相关系数高达 0.98,两者变化规律相同,土壤易溶盐含量的变化直接影响了土壤电导率的变化趋势。工程治理区大量种植植被,而植物对土壤中的易溶盐的迁移影响较大,能直接导致土壤易溶盐含量的空间分异现象。所以,相较于未治理

区,工程治理区内易溶盐含量在一定土层深度明显增加,同时也使得土壤电导率明显上升。但土壤电导率与土壤盐渍化相关性较高^[27],而黑山嘴工程治理区表层土壤电导率较高,应警惕其在治理后试验区地表局部出现盐渍化现象。

3 讨论

风沙治理工程措施的选择与合理配置已成为当前风沙灾害防治研究的主要内容。通过各类机械、化学、生物工程与研究区环境、气候等有机结合,能有效延缓沙化过程,改善当地生态环境^[28-30]。敦煌市风沙治理工程以生物、机械工程相结合为主,本研究发现,研究区内进行的人工种植植被、布设阻沙栅栏与沙障、对工程治理区进行封禁保护等可以有效降低风速、减少输沙量、大大降低研究区内的起沙风频率,但由于机械工程对风沙的阻碍作用,地表积沙堆积厚度略有增加。以黑山嘴工程治理区布设的HDPE半隐蔽式沙障为例,根据屈建军等^[31]研究,HDPE固沙障能有效增大下垫面粗糙度,降低风速、减弱输沙强度,对外来风流阻拦效果好,对沙面具有良好的固定作用。由此可证明,HDPE固沙障和人工植被、阻沙栅栏等综合作用,使得研究区内风动力环境明显改善,为人工植被的继续生长提供了良好的生存条件,显著提升了研究区防风固沙能力且具有可持续性,防风固沙效益良好。除此之外,综合治理还能明显改变土壤各养分含量及比例,有效提高土壤肥力。黑山嘴工程治理区大量人工植被种植与机械工程布设及其两者间的综合作用,使其土壤含水量、养分含量都明显上升。这主要是由于机械工程的布设大大降低了工程治理区潜在风沙危害,为人工植被种植提供了良好的生长环境,而植物的凋落物与根系分泌物均能显著增加土壤养分含量、影响土壤盐分迁移,从而使得工程治理区土壤理化性质发生较大改变。张良侠等^[32]在京津沙源治理工程对草原土壤有机碳库的影响研究中发现,在风沙治理工程建设后,土壤固碳量显著增加、固碳速率显著上升,综合治理成效明显。这也印证了风沙治理工程对土壤改良成效明显,土壤质量明显提升,为今后试验地植被覆盖度增加、生态环境恢复提供了先决条件,也为当地土壤可持续发展奠定基础。

因地制宜地制定风沙治理工程模式一直是风沙灾害防治的重要议题,如何对风沙治理工程模式

进行效益评估和成本核算尤为关键^[33]。敦煌黑山嘴风沙综合治理工程模式及其综合效益对比分析对该问题的研究与发展具有重要的理论研究意义。以往的研究多侧重于风沙治理工程的野外监测及单一措施的效益评价,未对其综合效益进行对比分析^[34]。要实现因地制宜进行风沙治理工程建设,必须对各类治理模式进行综合效益评估,并结合当地风沙环境制定有针对性的治理措施与模式,开展风沙动态监测与数据更新,对现有治理模式进行适时调整,从而提高研究区的防风固沙、土壤改良效益。本研究结果表明,敦煌黑山嘴综合治理措施不仅防风固沙成效显著,为人工植被的生长提供了稳定的生境,也大大改善了当地的土壤条件,为今后其他植物的引进与生物措施的选择提供了机会,促进了当地的生态环境恢复,为中国西北干旱区风沙灾害防治和生态修复提供了借鉴。

4 结论

黑山嘴工程治理区与未治理区相比,平均风速明显降低,两者最大风速差达到了 $1.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;年起沙风频率降低至未治理区的 $1/4$ 以下, $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上年起沙风频率大大减少,季起沙风主导风向频率为对照区的 $1/4$,大风天气明显减少;年输沙势较未治理区降低 85% ,季输沙势随季节变化幅度减小,输沙强度也降低至较低水平。同时,工程治理区内土壤改良效益明显。与未治理区相比,工程治理区土壤养分在一定深度明显增加,土壤中全氮、全磷、全钾含量均在 5 cm 土层深度迅速增加,增长率分别达到了 322.5% 、 49.3% 、 15.1% ,而后迅速降低;水盐含量随土层深度变化也出现了明显的差异, 10 cm 处明显增加;全氮、易溶盐对其他组分的影响增大,土壤肥力显著提升;土壤电导率与易溶盐含量变化趋势几乎相同,相关性较好,相较于未治理区,工程治理区两者含量均在 5 cm 处明显增长。

黑山嘴风沙综合治理工程模式在防风固沙与土壤改良方面成效显著,这不仅有助于区域生态环境改善,同时也印证了生物与机械防沙工程相结合的综合治理模式可行性高、效益明显,为今后中国西北干旱区的风沙灾害防治和生态修复提供了借鉴。但在风沙综合治理工程具体实施中,仍需注意其可能存在的问题,本研究中黑山嘴风沙口在经过治理后土壤电导率与土壤盐渍化均在 5 cm 土层深度明显增长,且两者间相关性较高,应警惕工程治

理区地表局部出现盐渍化现象。

参考文献：

- [1] 潘伯荣,李崇舜,刘文江.新疆沙漠与风沙灾害治理研究[J].中国生态农业学报,2001(3):23-25.
- [2] 程红霞,林粤江,汪权方,等.新疆西部不同植被类型NDVI对风沙灾害的响应[J].生态环境学报,2013,22(11):1763-1768.
- [3] 高尚玉,史培军,哈斯,等.我国北方风沙灾害加剧的成因及其发展趋势[J].自然灾害学报,2000(3):31-37.
- [4] 王玉竹,闫浩文,王小平.新疆风沙灾害风险评估[J].中国沙漠,2020,40(6):13-21.
- [5] 马育军,王静爱,李小雁.宁夏中北部风沙灾害潜在风险区域对比评价[J].自然灾害学报,2007(5):1-8.
- [6] 春梅,阿拉腾图雅,图雅.基于3S技术的锡林郭勒盟风沙灾害综合评价[J].西部资源,2013(3):142-144.
- [7] 常春平,原立峰.拉萨河下游河谷区风沙灾害现状、成因及发展趋势探讨[J].水土保持研究,2010,17(1):122-126.
- [8] 王家强,郑德明,柳维扬,等.风沙灾害对南疆棉花光合特性的影响[J].环境科学与技术,2014,37(8):47-53.
- [9] 宋祺,张绪冰,蔡红玥,等.古尔班通古特沙漠路域风沙灾害风险评估与时空格局分析[J].干旱区资源与环境,2022,36(10):113-123.
- [10] 周兴佳.新疆绿洲的风沙灾害和减灾对策[J].新疆环境保护,1994(4):164-170.
- [11] 于文儒.新疆和田地区风沙灾害及其治理措施[J].新疆环境保护,1993(3):30-32.
- [12] 刘斌,赵光耀,杜守君,等.黄土高原风沙区综合治理关键措施组合模式[J].水土保持通报,2001(6):64-68,82.
- [13] 肖斌,纪永福,安富博,等.玛曲高寒草原风沙危害及其综合治理模式[J].甘肃林业科技,2011,36(4):14-18.
- [14] 吴丹,巩国丽,邵全琴,等.京津风沙源治理工程生态效应评估[J].干旱区资源与环境,2016,30(11):117-123.
- [15] 付日勤.基于3S的晋北风沙源治理工程生态效益评价[J].山西大学学报(自然科学版),2019,42(3):691-697.
- [16] 于漫,于飞,王东阳,等.基于地下水流场和含水介质分析的敦煌月牙泉成因研究[J].甘肃地质,2019,28(增刊1):80-84.
- [17] 张正偲,董治宝,赵爱国.输沙势计算中的“时距”问题[J].干旱区地理,2010,33(2):177-182.
- [18] 黄翠华,张伟民,李爱敏.莫高窟窟顶风况及输沙势研究[J].中国沙漠,2006,26(3):394-398.
- [19] 张克存,俎瑞平,屈建军,等.腾格里沙漠东南缘输沙势与最大可能输沙量之比较[J].中国沙漠,2008,28(4):605-610.
- [20] Fryberger S G. Dune forms and wind regime[M]//McKee E D. A Study of Global Sand Seas. Honolulu, Hawaii, USA: University Press of the Pacific, 1979: 137-169.
- [21] 张克存,牛清河,屈建军,等.敦煌鸣沙山月牙泉景区风沙环境分析[J].中国沙漠,2012,32(4):896-900.
- [22] 边凯,高君亮,辛智鸣,等.乌兰布和沙漠北缘绿洲防护林体系防风阻沙能力研究[J].首都师范大学学报(自然科学版),2021,42(1):48-53.
- [23] 陶冶,吴甘霖,刘耀斌,等.古尔班通古特沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征及其影响因素[J].中国沙漠,2017,37(2):305-314.
- [24] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1): 139-151.
- [25] 陈婧,崔向新,丁延龙,等.基于“肥岛”效应探讨人工梭梭土壤养分时空演变趋势[J].水土保持研究,2019,26(6):71-79.
- [26] 党晓宏,高永,虞毅,等.库布齐沙漠北缘8种荒漠灌丛生物量预测模型研究[J].干旱区资源与环境,2016,30(5):168-174.
- [27] 石澎雨,石晓萍,侯玉梅,等.祁连山自然保护区祁丰林区森林土壤电导率和盐分含量[J].安徽农业科学,2021,49(9):127-129.
- [28] 屈建军,凌裕泉,刘宝军,等.我国风沙防治工程研究现状及发展趋势[J].地球科学进展,2019,34(3):225-231.
- [29] 冯连昌,卢继清,邸耀全.中国沙区铁路沙害防治综述[J].中国沙漠,1994,14(3):47-53.
- [30] 闫晋华.大同市南郊区2013-2015年度京津风沙源治理工程实施成效分析[J].防护林科技,2018(6):73-74.
- [31] 屈建军,井哲帆,张克存,等.HDPE蜂巢式固沙障研制与防沙效应实验研究[J].中国沙漠,2008,28(4):599-604.
- [32] 张良侠,樊江文,张文彦,等.京津风沙源治理工程对草地土壤有机碳库的影响:以内蒙古锡林郭勒盟为例[J].应用生态学报,2014,25(2):374-380.
- [33] 黄晓霞,程宏,蒋宁,等.京津风沙源治理对生态系统服务的影响及其效益核算[J].科学通报,2022,67:1-14.
- [34] 蒋九华.北京市京津风沙源治理二期林业工程生态效益评价研究[D].北京:北京林业大学,2019.

Analysis of comprehensive benefits of wind-blown sand control projects: a case study of Heishanzui, Dunhuang, China

Pan Jiapeng^{1,2}, Zhang Kecun¹, An Zhishan¹, Zhang Hongxue^{1,2}, Xue Chengjie^{1,2}

(1. *Dunhuang Gobi and Desert Ecological and Environmental Research Station / Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Based on the analysis and observation of the near-surface wind power environment and soil physical and chemical properties of the Dunhuang Heishanzui engineering control area and unregulated area, the research studied the wind regime and sand-fixation's comprehensive benefits under the regulated project of Heishanzui. It is helpful for the wind dynamic in-depth study in this region for the future and provides the reference of the sandstorm disaster comprehensive governance. The results show that the average wind speed and the frequency of sand-driving wind are significantly reduced, the intensity of sand transport is reduced, the annual sand transport potential is reduced by 85%, and the windy weather is reduced in the Heishanzui engineering control area compared with the unregulated area. In the same time, the contents of soil nutrients, water and salt increased significantly at a certain depth. Taking total nitrogen, total phosphorus and total potassium as an example, their growth rates reached 322.5%, 49.3% and 15.1% at 5 cm depth, respectively. The effects of total nitrogen and soluble salt on other components increased, and soil fertility increased significantly. The change trend of soil conductivity and soluble salt content was the same in the two regions, but the two contents increased significantly in the soil surface in the engineering control area, so we should be vigilant of surface salinization.

Key words: sandstorm control project; Dunhuang; sand-driving wind; drift potential; soil physical and chemical properties