

腾格里沙漠东南缘风沙环境及其对 交通干线生态防护体系的影响

黄磊¹, 张余^{2,3}, 何明珠², 安志山²

(1. 宁夏公路建设管理局, 宁夏 银川 750002; 2. 中国科学院 西北
生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 101407)

摘要: [目的] 研究腾格里沙漠东南缘沙坡头地区的输沙势和最大可能输沙量的空间分布及变化规律, 为包兰铁路风沙防护体系的维护及管理提供数据支撑。[方法] 利用该地区 1980—2010 年的气象资料, 探讨该区域多年来降水、风况、气温、输沙势等环境因子的变化趋势。[结果] 该区域降水年际波动较大, 且具有阵性特征; 春夏两季的起沙风频率占全年总量的 72.3%, 主导风向为 WNW-NNW 和 NE-E 两组, 大风多集中在春季; 区域最大可能输沙量和输沙势具有较好的相关性。[结论] 结合包兰铁路沙坡头段风沙防护体系现状, 后期可以考虑将体系结构设置为 A 字形, 以取得更好的防护效果。

关键词: 腾格里沙漠; 风沙环境; 最大可能输沙量; 包兰铁路

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)02-0135-05

中图分类号: P931.3

文献参数: 黄磊, 张余, 何明珠, 等. 腾格里沙漠东南缘风沙环境及其对交通干线生态防护体系的影响 [J]. 水土保持通报, 2018, 38(2):135-139. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.02.022. Huang Lei, Zhang Yu, He Mingzhu, et al. Aeolian environment and its effects on ecological protection system of traffic trunk on southeastern edge of Tengger Desert[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2):135-139.

Aeolian Environment and Its Effects on Ecological Protection System of Traffic Trunk on Southeastern Edge of Tengger Desert

HUANG Lei¹, ZHANG Yu^{2,3}, HE Mingzhu², AN Zhishan²

(1. Ningxia Highway Construction Administration Bureau, Yinchuan, Ningxia
750002, China; 2. Northwest Institute of Eco-environment and Resources, CAS, Lanzhou,
Gansu 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China)

Abstract: [Objective] The paper studied the sand drift potential and the maximum possible sand-transporting quantity, and its spatial distribution features and variation on the southeastern edge of the Tengger Desert, then to provide scientific foundation and advice for the construction and management of railway protection system. [Methods] Based on the date of meteorological from 1980 to 2010, the variation tendencies of precipitation, wind condition, air temperature and sand drift potential were discussed. [Results] Precipitation varied greatly from year to year, and had fitful characteristics. The frequency of wind-sand in spring and summer was 72.3%, the wind direction was dominated by WNW-NNW and NE-E, strong winds were concentrated in spring. The sand drift potential and the maximum possible sand-transporting quantity had a good correlation. [Conclusion] According to the current situation of Baotou-Lanzhou Railway protection system at Shapotou section, it is better to shape the system to A shaped structure to achieve better protection effect.

Keywords: Tengger Desert; aeolian environment; railway protection system; maximum possible sand-transporting quantity

风经过疏松沙表面时,其固有的搬运能力将沙粒吹起,形成风沙运动。风沙运动是土地荒漠化的主要

动因,是沙漠和沙漠化科学及其研究体系的重要组成部分。我国学者对沙漠科学进行了大量的系统性研

究^[1-3],特别是对于交通干线防沙治沙方面,取得了卓越的效果。早在 1954 年,国内学者就结合包兰铁路选线和防护工作,开展了对腾格里沙漠东南缘风沙地貌^[4-5]、沙漠演化^[6-7]、风沙活动规律^[8]、沙生植物^[9]等研究。近年来,腾格里沙漠东南缘风沙运动及生态防护研究多集中在沙丘表面流场^[5]、植被格局^[10]、土壤含水量和生物结皮等方面^[11]。从单一的固沙功能来说,腾格里沙漠东南缘铁路生态防护体系抑制了流沙的危害,体系内风沙沉降物源逐渐由沙粒转变为大气降尘^[12],确保了包兰铁路几十年畅通无阻。此外,风沙环境特征是设计和建立防护体系的重要参考指标,是确保其稳定的理论基础。屈建军等^[13]对沙坡头地区的风沙运动规律进行了长期监测,详细阐述了该地区风沙流结构及格状沙丘移动与防护体系的相互作用,并对半隐蔽格状沙障的防护效益进行了综合评价^[14]。此外,随着时间的推移,体系外围风沙环境发生转变,为保证防护体系功能的稳定性,铁路管理部门需不断在原有防护体系的基础上对防护体系局部结构和功能进行补充和微调。因此,亟需对区域风沙环境演变趋势进行系统性研究。本文通过分析腾格里沙漠东南缘沙坡头地区近 30 a 来气象资料,并结合人工防护体系的发展演化过程,深入研究区域风沙环境的变化趋势,研究结果对揭示这一特殊地带的风沙活动规律及完善人工防护体系有着重要的现实意义。

1 研究区概况

腾格里沙漠东南缘沙坡头地区深居西北内陆(104°48′—105°10′E, 37°25′—37°38′N),南邻黄河,属于草原化荒漠地带,地势西北高东南低,海拔 1 200~1 600 m。沙丘类型以格状沙丘为主,伴有新月型沙丘和及其沙丘链,其间多有沙窝,并见出露粉沙土和根套。大陆荒漠性气候显著,年均降雨量 176.5 mm,年均蒸发量 1 500~2 000 mm。包兰铁路沙坡头段防护体系总长约 15 km,主要采取“以固为主,固阻结合”的原理,即由前沿阻沙带、封沙育草带、草障植物带、灌溉造林带和卵石防火带五带组成。完整的防护体系只有 2 km 左右,主要包括 4 个带。第一带:前沿阻沙带,利用不同植物枝条做成高度为 1 m 左右的立式栅栏,初设栅栏时,在其两侧设置 1~4 行草方格沙障,防止栅栏根部“掏蚀”;第二带:无灌溉条件下的 1 m×1 m 半隐蔽草方格沙障与植物措施保护下的固沙带,是防护体系的主体;第三带是灌溉条件下的乔灌木林带;第四带为砾石平台缓冲输沙带^[15]。

2 资料与方法

数据来源于中国气象局气象数据中心(<http://data.cma.cn>)和沙坡头地区野外定位站的气象资料。输沙势通常采用 Fryberger^[16]的计算方法:

$$D_p = V^2 (V - V_i) t \quad (1)$$

式中: D_p ——输沙势(VU); V ——大于 5 m/s 的起沙风速(m/s); V_i ——起动风速(m/s); t ——起沙风作用时间,一般以频率表示。

最大可能输沙量采用凌裕泉^[17]的计算方法:

$$Q = 0.895 (V - V_i)^{1.9} T \quad (2)$$

式中: Q ——最大可能输沙量(kg/m·a); V ——起沙风速(m/s); V_i ——临界起沙风速(m/s); T ——累计持续时间(min)。

3 结果与分析

3.1 气温、降雨及风况

如图 1 所示,研究区内月平均气温变化具有典型大陆性气候特点,7 月份月平均气温最高,1 月份月平均气温最低。降水量主要集中在 4—10 月,占年内总降水量的 95.2%,最高降水出现在 8 月份。分析多年季度平均降水量可知,夏季降水量最多,冬季降水量最少。且降水量的年际波动幅度较大,年最小降水量(1982 年)和年最大降水量(1985 年)相差 173.5 mm,降水距平百分率在 -5.3%~4.4% 之间变化。除此之外,1983 年日降水量 56.2 mm,占年总降水量的 24.7%。可见研究区域降水量不仅年际变化较大,且表现出降水时间短,但降水强度变化大。沙坡头多年年平均风速为 2.4 m/s,风季主要集中在 3—5 月,风季月平均风速均超过 2.5 m/s,1 月平均风速最低。从年际平均风速的分布来看(1991—2003 缺测),21 世纪平均风速明显较 20 世纪有所增加,以春季为例,年均风速由 20 世纪 80 年代初期的 2.36 m/s 增至 21 世纪 00 年代中期的 3.22 m/s,随后又有所减小,且各年代春季风速值均大于其它季节。极大风速是给定时间段内瞬时风速的最大值,对风沙防护体系和铁路的运行危害较大,是防护体系设置重要的理论参数之一。根据资料统计,该地区极端最大风速 37.9 m/s,风向为西北风。

3.2 起沙风

从各季度起沙风统计情况来看(图 2),风速主要集中在 5.0~10.0 m/s,频次为 7 018 次,占起沙风总频次的 98%,随着风速等级的增加,频次呈减少趋势。分析各季度起沙风频次分布规律,可知春夏两季

的起沙风频次占到全年起沙风总频次的 72.3%，是秋冬两季的 2.6 倍，且春季起沙风频次最高，为 3 138 次。在各风速等级内，随着风速的增加，春季占全年起沙风比例呈增加趋势，即大风天气多集中在春季。统计各方位起沙风频次和频率后，发现起沙风可分为 WNW-NNW 组风向和 NE-E 组风向两组，且 NE-E

组风向频次略高于 WNW-NNW 组风向。此外，主风向在各个季度内的变化不明显，各个季度主风向均是 WNW-NNW 组风向和 NE-E 组风向的起沙风占最大比例。比如春季 WNW-NNW 组风向和 NE-E 组风向方位的起沙风所占比重达到该季度的 44.7%，秋季 WNW-NNW 组风向的起沙风频率更是高达 64.5%。

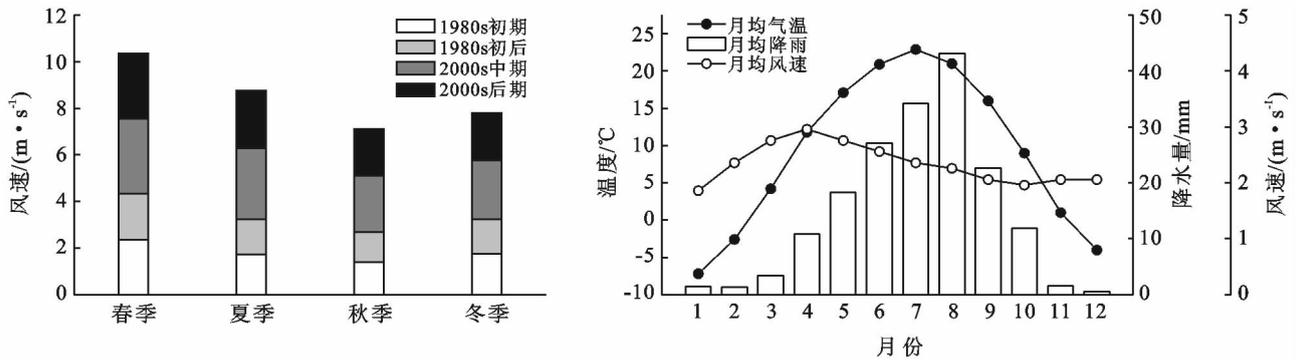


图 1 沙坡头地区气温、降雨、风速随时间变化特征

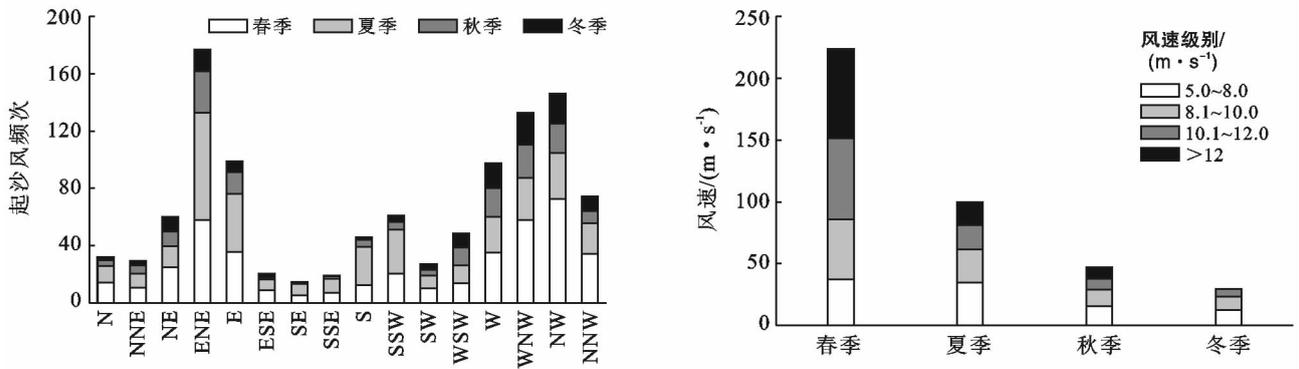


图 2 沙坡头站 2000—2010 年各季度起沙风频次及风速级别

3.3 输沙势分析

输沙势(D_p)又称输沙风能,它反映了风速统计中某一方位风向在一定时间内搬运沙的能力,是衡量区域风沙活动强度及风沙地貌演变的重要指标之一^[20]。从历年输沙势的变化情况看(图 3),合成输沙势的年际波动较大。1984—1989 合成输沙势逐渐减小,1989 年取的最小值 57.46VU,之后逐年增加,至 1994 年取得极大值 171.02VU 后再次减小并稳定在 40VU 左右。可见,1994 年之前区域属于中等风能环境,1994 年之后转变为低风能环境。除 2010 年东北方向的输沙势要远大于西北方向合成输沙方位为偏西南方向外,其余年份合成输沙方向都在偏东南方向,即区域西北方向的风力相对较强。输沙风势与输沙风能的比值(R_{DP}/D_p)均小于 0.8,方向变率属于中小比率。综上所述,区域输沙势年际波动幅度较大,且区域大多数年份表现为西北方向的输沙活动强于东北方向,

但也存在东北方向输沙能力大于西北方向的年份。

3.4 最大可能输沙量

最大可能输沙量(R_Q)是指沙源充足,沙面平坦裸露时,气流充分作用流沙表面所具有对沙物质的最大可能搬运能力,它是输沙量的理论极限值^[17]。动力风玫瑰($Q\%$)将风向、风速和输沙量综合于一体,可以更加突出地显示输沙强度的空间分布,为沙坡头铁路防护体系可以承载的最大沙量提供具体数值依据。表 1 计算了 2000 年之后 16 个方位上的最大可能输沙量。表中所示各年合成输沙方向均介于 $133.3^\circ \sim 161.8^\circ$ 之间(2009 和 2010 年除外),属于东南偏南方向,和输沙势的合成输沙方向较为一致(图 3)。2009 年最大可能输沙量和合成最大可能输沙量最小,分别为 16.24 和 $3.9 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{a})$,2000 年最大可能输沙量和合成最大可能输沙量最大,分别为 36.72 和 $13.87 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{a})$ 。为更加深入分析区域

风动力环境的特征,分别选取 2005,2008,2010 年的动力风玫瑰(Q%,如图 4 所示)。

首先剔除该地区次一级局地环流在方向场方面对风沙活动的影响,可更直观突出主体环流的动力作用,之后结合输沙势的空间分布规律,继而研究风动力环境。研究表明输沙强度的分布具有稳定一致性,但西北风、东北风和西南风强度却呈现明显的不均一性。如 2005 年合成最大可能输沙量为 5.74 m³/(m·a),合成方向 153°,表明沙坡头地区 1m 高的单个新月型

沙丘,沿合成方向年移动量不会超过 5.74 m。实际上,沙坡头地区风沙活动受到多组风沙流场的相互制约,沙丘移动过程表现为格状沙丘主梁和副梁在风力作用下的往复摆动^[13],并非朝单一方向运移,从而导致沙丘形态季节性和年际性变化剧烈,沙丘的推移速度其实与理论值相比较小。但往复摆动的沙丘体仍对防护体系产生潜在威胁,很容易在前沿阻沙带形成沙垄继而破坏防护体系,并成为二次沙源,危害植被固沙带,甚至影响铁路安全运营。

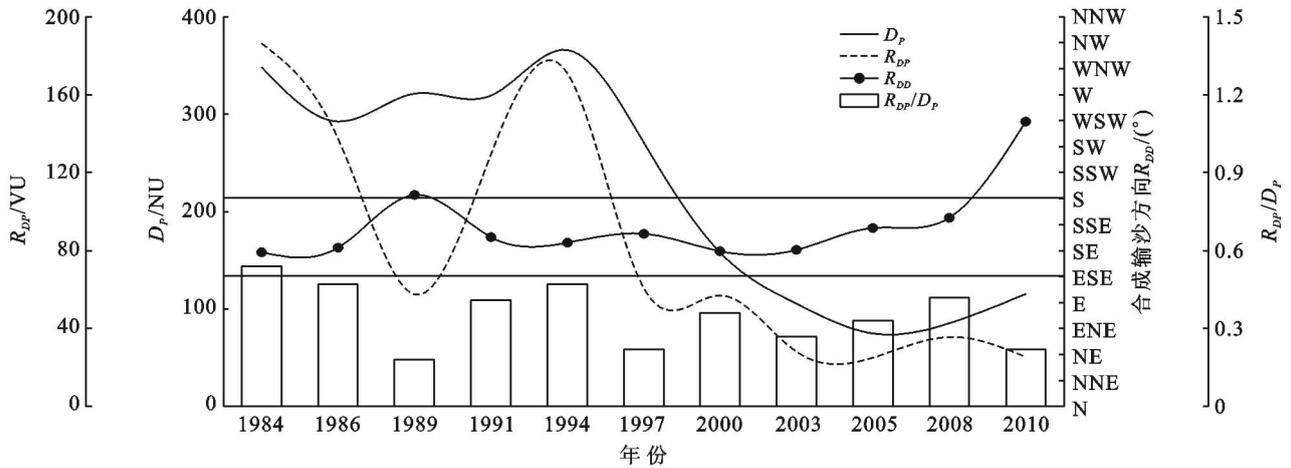


图 3 沙坡头站 1984—2010 年输沙势各参数年际变化

表 1 沙坡头历年最大可能输沙量计算结果

m³/(m·a)

年份	不同方位最大可能输沙量																Q	R _Q	R _A
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW			
2000	0.40	0.11	0.69	8.34	0.47	0.29	0.51	0.70	1.03	0.75	0.36	1.34	5.46	8.59	6.51	1.15	36.72	13.87	133.30
2001	1.44	0.72	0.86	5.56	1.40	0.22	0.38	0.60	1.19	1.12	0.59	0.80	3.68	6.15	7.41	1.72	33.84	13.60	138.44
2002	0.85	0.55	1.23	4.74	2.19	0.52	0.30	0.77	0.72	1.30	1.09	1.45	1.89	4.35	3.48	1.73	27.16	6.10	152.12
2003	0.84	0.30	0.40	4.65	1.94	1.02	0.38	0.45	0.85	0.95	0.43	1.29	3.38	5.47	3.80	0.86	27.00	7.18	135.86
2005	0.82	0.34	0.17	0.76	2.72	0.16	0.15	0.53	0.97	0.36	0.27	0.27	0.64	2.06	3.49	2.76	16.48	5.74	152.99
2007	0.42	0.21	0.48	0.77	1.80	0.60	0.22	0.31	0.20	0.36	0.11	0.07	0.89	2.71	6.57	2.22	17.94	9.55	143.49
2008	0.84	0.56	1.66	1.89	2.85	0.22	0.11	0.13	0.21	0.56	0.23	0.30	1.12	3.26	4.57	2.20	20.70	8.92	161.76
2009	0.24	1.09	2.53	3.90	1.63	0.40	0.13	0.10	1.36	1.61	0.28	0.24	0.96	0.87	0.66	0.25	16.24	3.90	237.62
2010	0.61	1.32	5.78	6.46	2.29	0.78	0.77	0.17	1.92	2.33	0.87	1.90	2.14	1.11	0.34	0.60	29.39	7.59	245.14

注:表中 Q, R_Q 和 R_A 分别表示总最大可能输沙量、合成最大可能输沙量和合成输沙方向。

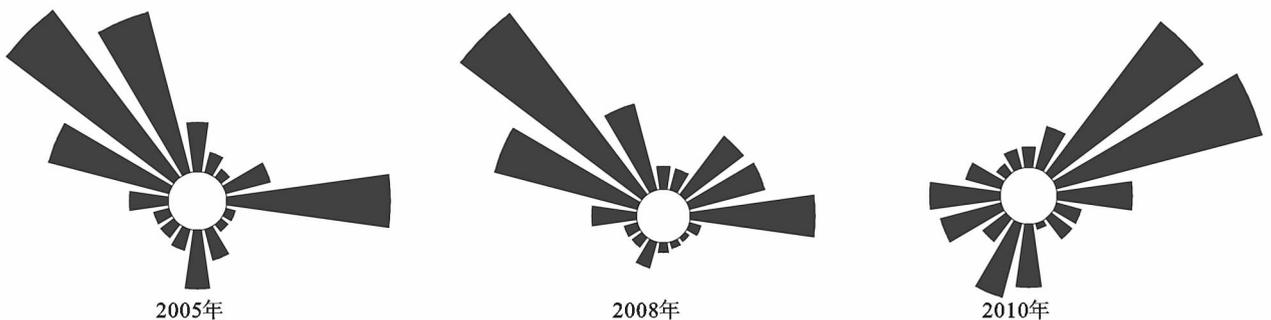


图 4 研究区 2005,2008,2010 年动力风玫瑰图

4 输沙势与最大可能输沙量比较

通过回归年输沙势和最大可能输沙量,可知两者呈显著正相关关系,线性相关系数 $R^2 = 0.95$,且两者存在同期波动特征。例如,2000年,输沙势为158.17VU,最大可能输沙量为 $36.72 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{a})$;2005年,输沙势下降为75.1VU,而最大可能输沙量也随之下降至 $16.48 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{a})$;到2010年,输沙势上升为115.37VU,最大可能输沙量增加至 $29.39 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{a})$ 。

5 讨论

沙坡头地区受蒙古高压影响,加之周边地形影响,大陆性荒漠气候明显,降雨少而集中,区域风沙环境复杂多变,具有明显的季节性和方向性。由于包兰铁路走向大致为东西,而区域内盛行西北风和东北风,前人研究的成果表明当人工防护体系走向与主风向近似垂直时,可取的较好的防护效益,当两者交角较小时,防护效果会明显下降^[21],区域内铁路防护体系的走向基本与铁路平行,因而从理论上可以判定前期设计者并没有将防护体系的防护效益最大化,但仍取得了令人满意的防护效果,其主要原因主要有:①虽阻沙栅栏与主导风向的夹角略小,但通过布设多道阻沙栅栏,仍可达到阻沙的效果。②由于区域有与阻沙栅栏主体走向一致的起沙风,可使堆积在阻沙栅栏附近的流沙向两侧输导,在一定程度上减轻防护体系的积沙危害。③人工灌溉下的乔灌木林带多年来一直处在封育阶段,植被种类增多,覆盖率增大,防风固沙能力增强。④由草方格和无灌溉人工植被组成的固沙带作为防护体系的主体部分,受区域降雨变化影响,土壤水分“浅层化”,更易于表层土壤结皮的形成。可见,包兰铁路防护体系的设置虽理论上没有取得较优,但其优化了其余防护措施防护功能,故达到了较好的防护效果。但在后期风沙防护体系优化过程中,为实现防护效益的较大化,防护体系设置的走向应尽可能与主导风向垂直。基于以上原因,本文建议新建防护体系可设置成A字形,使西北和东北两组风向与防护体系尽可能垂直,实现防护效益的较大化。

6 结论

作为衡量输沙强度的重要指标,研究区输沙势的年际变化大,在1994年取得极大值后,输沙势开始逐年减小,且多数情况下西北方向的输沙活动强于东北方向,但也存在东北方向输沙能力大于西北方向的年份。最大可能输沙量的计算结果对防护体系可以承

载的最大沙量具有参考意义,在2000年Q和 R_Q 达到36.72,13.87 $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{a})$,以后逐年下降,到2009年减小至16.24和3.9 $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{a})$ 。输沙势和最大可能输沙量的分析表明:两者呈现明显的正相关,且具有较高的显著性。结合前人研究结论,包兰铁路防护体系理论上并没有将防护效益最大化,因此建议后期体系结构设置为A字形,以取得较好的防护效果。同时,在维护过程中要注重体系内植被的更新及演替,特别是在春夏季,输沙强度大,铁路沙害严重,而此时植被处于萌芽阶段,地表覆盖少,防护效益差,因此还需加大机械沙障的建设,以保证防护体系逐渐向稳态发展。

[参 考 文 献]

- [1] 朱震达,吴正,刘恕,等. 中国沙漠概论[M]. 北京:科学出版社,1980.
- [2] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京:科学出版社,1987.
- [3] 王涛. 中国沙漠与沙漠化[M]. 河北 石家庄:河北科学技术出版社,2003.
- [4] 哈斯,董光荣,王贵勇. 腾格里沙漠东南缘格状沙丘的形态—动力学研究[J]. 中国科学(D辑):地球科学版,1999,29(5):466-471.
- [5] 哈斯,王贵勇,董光荣. 腾格里沙漠东南缘格状沙丘表面气流及地貌学意义[J]. 中国沙漠,2000,20(1):30-34.
- [6] 阎满存,董光荣,李保生,等. 腾格里沙漠东南缘沙漠演化的初步研究[J]. 中国沙漠,1998,18(2):111-117.
- [7] 强明瑞,李森,金明,等. 60 ka 来腾格里沙漠东南缘风成沉积与沙漠演化[J]. 中国沙漠,2000,20(3):256-259.
- [8] 任小玢. 腾格里沙漠东南缘风沙流特征[D]. 陕西 西安:陕西师范大学,2013.
- [9] 满多清,吴春荣,徐先英,等. 腾格里沙漠东南缘荒漠植被盖度月变化特征及生态恢复[J]. 中国沙漠,2005,25(1):140-144.
- [10] 李新荣,贾晓红. 腾格里沙漠东南缘荒漠植被格局与土壤资源的关系[J]. 草地学报,2005,13(S):37-43.
- [11] 张鹏,李新荣,张志山,等. 腾格里沙漠东南缘生物土壤结皮的固氮潜力[J]. 应用生态学报,2012,23(8):2157-2164.
- [12] 张加琼,张春来,吴晓旭,等. 包兰铁路沙坡头段防护体系内的风沙沉降规律[J]. 中国沙漠,2014,34(1):16-22.
- [13] 屈建军,凌裕泉,并哲帆,等. 包兰铁路沙坡头段风沙运动规律及其与防护体系的相互作用[J]. 中国沙漠,2007,27(4):529-533.
- [14] 屈建军,凌裕泉,昝瑞平,等. 半隐蔽格状沙障的综合防护效益观测研究[J]. 中国沙漠,2005,25(3):329-335.
- [15] 杨丽雯,王大勇. 沙坡头人工植被防护体系防风固沙功能价值评价[J]. 山西师范大学学报:自然科学版,2009,23(4):94-98.

- [11] 魏伟,石培基,周俊菊,等. 基于 GIS 和组合赋权法的石羊河流域生态环境质量评价[J]. 干旱区资源与环境, 2015,29(1):175-180.
- [12] 凡宸,夏北成,秦建桥. 基于 RS 和 GIS 的县域生态环境质量综合评价模型:以惠东县为例[J]. 生态学报, 2013,32(3):719-725.
- [13] 王鹏,魏信,乔玉良. 多尺度下汾河流域生态环境质量评价与时序分析[J]. 遥感技术与应用, 2011,26(6):798-807.
- [14] 张春桂,李计英. 基于 3S 技术的区域生态环境质量监测研究[J]. 自然资源学报, 2010,25(12):2060-2071.
- [15] 易武英,苏维词. 基于 RS 和 GIS 的乌江流域生态安全度变化评价[J]. 中国岩溶, 2014,33(3):2308-2318.
- [16] 郜红娟,韩会庆,俞洪燕,等. 乌江流域重要生态系统服务地形梯度分布特征分析[J]. 生态科学, 2016,35(5):154-159.
- [17] 向鹏,王仕禄,卢玮琦,等. 乌江流域梯级水库的氮磷分布及其滞留效率研究[J]. 地球与环境, 2016,44(5):492-501.
- [18] 王尧,蔡运龙,潘懋. 贵州省乌江流域土壤侵蚀模拟:基于 GIS, RUSLE 和 ANN 技术的研究[J]. 中国地质, 2014,41(5):1735-1747.
- [19] 中国水利百科全书编辑委员会. 中国水利百科全书[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社, 2006:90-97.
- [20] 李洪义,史舟,郭亚东,等. 基于遥感与 GIS 技术的福建省生态环境质量评价[J]. 遥感技术与应用, 2006,21(1):49-54.
- [21] 田庆久,闵祥军. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展, 1998,13(4):327-333.
- [22] 白艳芬,马海州,张宝成,等. 基于遥感和 GIS 技术的青海湖环湖地区生态环境脆弱性评价[J]. 遥感技术与应用, 2009,24(5):635-641.
- [23] 史世莲,章文波,王国燕. 北京地区植被盖度提取及其分布变化研究[J]. 遥感技术与应用, 2014,29(5):866-872.
- [24] 许幼霞,周旭,赵翠薇,等. 1990—2015 年间贵州省植被生态环境质量变化特征[J]. 地球与环境, 2017,45(4):434-440.
- [25] Huang C, Wylie B, Yang L. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002,23(8):1741-1748.
- [26] 王福民,黄敬峰,徐俊峰. 基于穗帽变换的 IKONOS 多光谱和全色影像融合[J]. 浙江大学学报:工学版, 2008,42(8):1380-1384.
- [27] 徐建春,赵英时,刘振华. 利用遥感和 GIS 研究内蒙古中西部地区环境变化[J]. 遥感学报, 2002,6(2):142-149.
- [28] 赵慧,张明明,赵艳玲. TM6 温度信息提取研究[J]. 科技创新导报, 2008,17(7):7.
- [29] 邓慧平,李秀彬. 地形指数的物理意义分析[J]. 地理科学进展, 2002,21(2):103-110.
- [30] 朱远辉,刘凯,艾彬,等. 新丰江流域生态环境质量遥感评价[J]. 热带地理, 2013,33(2):133-140.

(上接第 139 页)

- [16] Fryberger S G. Dune forms and wind regime[M]// Mckee E D. A Study of Global Sand Seas. US Geological Survey Professional Paper, 1979.
- [17] 凌裕泉. 最大可能输沙量的工程计算[J]. 中国沙漠, 1997,17(4):362-368.
- [18] 康立新,林华顺,蔡顺章,等. 与风向成不同交角时林带防风效果的透风系数关系的探讨[J]. 林业科技通讯, 1982(11):21-24.
- [19] 张春来,邹学勇,程宏,等. 包兰铁路沙坡头段防护体系近地面流场特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006,14(3):353-360.
- [20] Bullard J E. A note on the use of the 'fryberger method' for evaluating potential sand transport by wind[J]. Journal of Sedimentary Research, 1997, 67(3):499-501.
- [21] 朱金兆,贺康宁,魏天兴,等. 农田防护林学[M]. 北京:中国林业出版社, 2010.
- [22] 张伟民,王涛,薛娟,等. 敦煌莫高窟风沙危害综合防护体系探讨[M]. 中国沙漠, 2000,20(4):409-414.
- [23] 石莎,马风云,刘立超,等. 沙坡头地区不同植被结构对沙地土壤水分的影响[J]. 中央民族大学学报:自然科学版, 2004,13(2):137-141.
- [24] 李新荣,马风云,龙立群,等. 沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J]. 中国沙漠, 2001,21(3):217-222.