

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.

风沙活动强度3种估算指标对比及适用性分析

王兆云^{1,2},牛改红^{1,2},柳本立¹

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

摘要: 风沙活动强度是风沙地区交通、能源基地等基础设施建设和运营中科学开展风沙工程防护设计须考虑的重要内容。但在实际工作中尚缺乏操作性强、适用性广的风沙活动强度估算指标。本研究选取风蚀气候侵蚀力、沙丘活化指数和输沙势3种常用指标,基于中国北方风沙区多个具体工程案例,对比分析了3种指标的适宜性及存在问题。结果表明:(1)由于没有考虑工程周边沙源丰富程度的相关影响因素(如植被、戈壁砾石的覆盖度),3种指标的估算结果均难以准确客观地反映具体工程的实际风沙问题。(2)采用高精度风速风向数据计算的输沙势更能表达干旱地区的风沙活动特征,但在降水较多的区域偏差较大。(3)铁路等线性工程两侧风沙活动强度可能存在差异,相同防沙措施的防护效益存在明显差别,具体工程风沙活动强度的估算应明确其方向性差异。在指导防护体系建设时,需尽可能考虑降水、气温、风速、风向等多种因子,同时结合沙源、地表覆盖度、工程走向等实际情况来分析风沙活动强度差异。研究结果有助于提出一种准确度高、适用性广、可操作性强的风沙活动强度估算指标,为有效开展防沙工程设计提供指导。

关键词: 风沙活动强度; 风蚀气候侵蚀力; 沙丘活化指数; 输沙势

文章编号: 1000-694X(2021)03-118-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00030

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

中国是全球沙区交通线路最长的国家,累计长度约为2.3万 km^[1-2],其中约有6 000 km的风沙危害区段^[3],困扰着沙区的交通建设和安全运营^[4-5]。为保障交通道路的正常运营,沙区交通路段两侧通常需要进行防护以防止流沙掩埋线路^[6-8]。在防护体系设计中,首先需要根据当地的风沙活动强度,确定所需的防护措施和规模^[9]。风沙活动强度主要决定于风力和下垫面状况两个因素,评价指标有多种^[10],其中风蚀气候侵蚀力、土壤风蚀量常用来评判土地风蚀强度^[11],沙尘暴日数、大气降尘量等指标可从宏观上反映不同区域的风沙活动强度差异^[12-13],输沙势和沙丘活化指数是常用的风沙活动强度指标^[14-15]。

在几十年的实践中,包兰铁路和塔克拉玛干沙漠石油公路防护体系等重大工程的成功,为其他交

通线路风沙灾害防治提供了成功的经验。凌裕泉^[16]、胡孟春等^[17]、王训明等^[18]、冯连昌等^[19]和徐峻岭等^[6]在考虑风沙运动规律、沙丘移动速度和有效使用年限等因子的基础上,结合风洞试验与野外实际观测,分别提出了风沙灾害防护体系的基本宽度模型。这些模型多采用沙丘移动速度作为参考指标,但不同部位的沙丘移动速度有显著差异,受防护体系影响,沙丘移动速度会显著减缓;另一方面,即使沙丘主体没有到达工程区,也会有大量风沙物质以风沙流的形式导致风沙危害;此外,很多工程项目建设在没有沙丘的地区,因此沙丘的移动速度难以直接作为防护宽度设计的参考。更重要的是,这些指标一般仅考虑风力,不能表达风速、降水、温度等气候因子的综合作用,难以在特定研究区外推广。

具体风沙灾害防护体系的设计,应当综合考虑气候条件、地表特征、工程走向等多方面参数。目前,输沙势、风蚀气候侵蚀力和沙丘活化指数是广

收稿日期:2021-01-21; 改回日期:2021-03-16

资助项目:美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23060201);中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(Y202085);内蒙古自治区交通运输厅建设科技项目(NJ-2018-29)

作者简介:王兆云(1994—),女,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为防沙工程。E-mail: wangzy@lzb.ac.cn

泛使用的风沙活动强度估算指标,可获得量化的结果,但各自的适用性如何,鲜有相关研究报道。在中国北方风沙区选择多个防沙工程的具体案例,分别计算其风蚀气候侵蚀力、沙丘活化指数和输沙势,并分析地表覆盖度、工程走向导致的差异,指出各指标的优缺点和环境适宜性,以期提出一种准确度高、适用性广、可操作性强的具体工程风沙活动强度估算指标。

1 研究方法

1.1 研究区概况

1.1.1 工程案例选择及自然环境概况

共选取6条沙区铁路、两条沙区公路的14个路段。其中,沙区铁路包括包兰铁路(包头-兰州)K707段(RB707)和K709段(RB709),临哈铁路(临

河-哈密)K420段(RL420)和K745(RL745),天策铁路(天鹅湖-策克)K25段(RT25),兰新高铁(兰州-乌鲁木齐)K2828段(RX2828)和K3010段(RX3010),敦格铁路(敦煌-格尔木)K77段(RD77),哈罗铁路(哈密-罗中)K105段(RH105)、K107段(RH107)和K109段(RH109);公路工程包括内蒙古S315公路K19段(S19)、K23段(S23)和民湖公路南段(M)。分布区域为内蒙古西部阿拉善高原地区、甘肃西北部河西走廊、敦煌地区 and 新疆东部哈密地区等(图1),是亚洲内陆沙漠和戈壁集中连片分布的地方,地势平坦且风速较大,分布有巴丹吉林、腾格里沙漠和库姆塔格沙漠,沙源丰富,总体风大沙多,风沙活动频繁。研究区范围为 36° — 44° N、 92° — 107° E,气候条件多样,自东向西由于旱区过渡到极端干旱区,所选案例可以覆盖沙区的大多数气候类型。

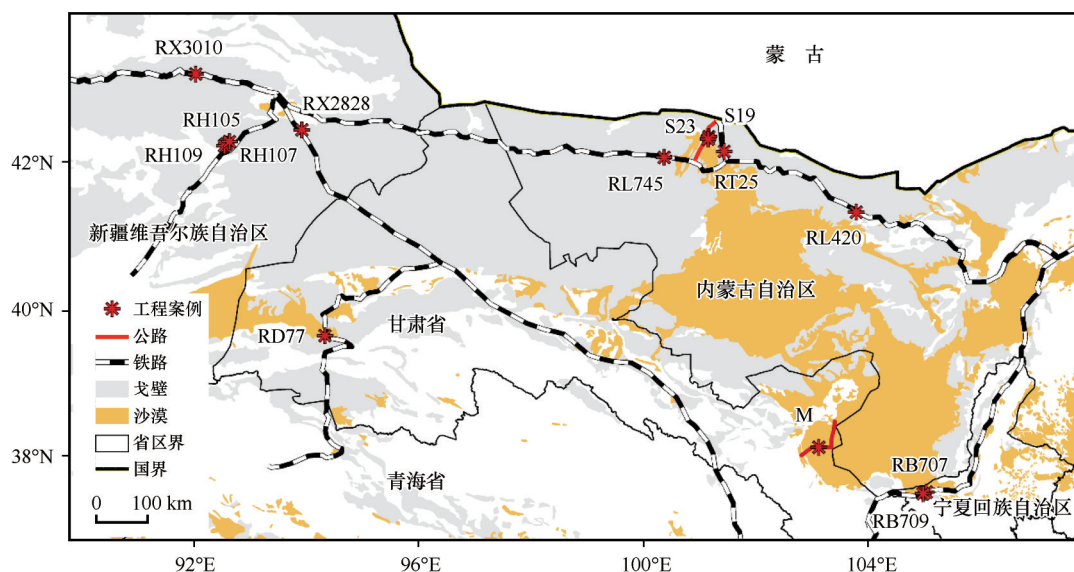


图1 研究区工程案例段分布

Fig.1 Distribution of the engineering cases in the study area

降水和风速是最主要的气候要素,也是风蚀气候侵蚀力和沙丘活化指数使用的计算参数。如图2所示,包兰铁路案例段和民湖公路南段案例段年降水量分别为133.64 mm和118.27 mm,属于干旱区,其余路段年降水量均在50 mm以下,属极端干旱区。研究区最小月均风速出现在民湖公路段,为 $1.31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大月均风速出现在兰新高铁K3010段,为 $6.44 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。风沙活动强度的科学估算指标,应当充分考虑降水和风速的差异。

1.1.2 防沙工程概况

由于沙区交通线路不同侧风沙危害可能存在

明显差异,有的仅在一侧布设防护工程。所选路段共有23个具体工程案例,包括包兰铁路K707段和K709段两侧、民湖公路南段两侧、天策铁路K25段两侧、临哈铁路K420段南侧和K745段两侧、S315公路K19段和K23段两侧、敦格铁路K77段西侧、兰新高铁K2828段和K3010段两侧、哈罗铁路K105段和K107段西侧、K109段北侧。通过卫星影像识别、实地考察和查阅文献等方式获取每个工程段工程体系的布设走向、地表特征和风沙危害现状,具体信息见表1。

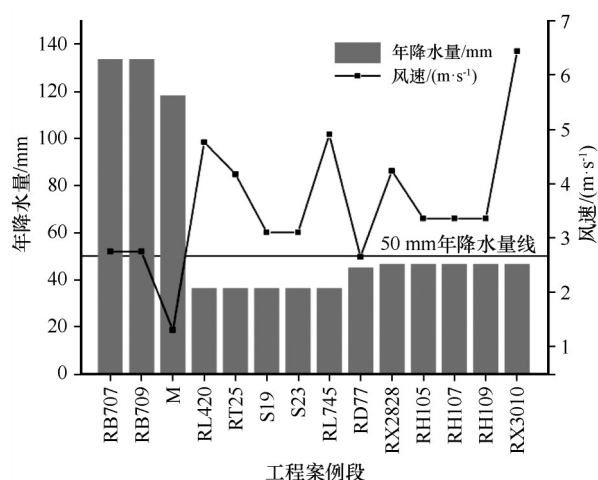


图2 工程案例区域的年降水量和风速

Fig.2 Annual precipitation and mean wind speed in the engineering case sections

表1 选取的防沙工程体系信息

Table 1 Statistics of selected sand control projects

工程案例段	工程走向	方向	编号
包兰铁路K707段	ENE-WSW	东侧	RB707-E
		西侧	RB707-W
包兰铁路K709段	NE-SW	东侧	RB709-E
		西侧	RB709-W
民湖公路南段	ESE-WNW	北侧	M-N
		南侧	M-S
临哈铁路K420段	ESE-WNW	南侧	RL420-S
天策铁路K25段	N-S	东侧	RT25-E
		西侧	RT25-W
S315公路K19段	NNE-SSW	东侧	S19-E
		西侧	S19-W
S315公路K23段		东侧	S23-E
		西侧	S23-W
临哈铁路K745段	W-E	北侧	RL745-N
		南侧	RL745-S
敦格铁路K77段	N-S	西侧	RD77-W
兰新高铁K2828段	NNW-SSE	东侧	RX2828-E
		西侧	RX2828-W
哈罗铁路K105段	NNE-SSW	西侧	RH105-W
哈罗铁路K107段	W-E	西侧	RH107-W
哈罗铁路K109段		北侧	RH109-N
兰新高铁K3010段	W-E	北侧	RX3010-N
		南侧	RX3010-S

1.2 评价指标与数据来源

1.2.1 评价指标

1.2.1.1 风蚀气候侵蚀力(C)

风蚀气候侵蚀力又称为气候侵蚀性或气候因子,主要包括风力、降水、蒸发和气温等气候要素^[20]。它对区域风沙活动强度具有较好的指征意义,在甘肃敦煌^[21]、青海省^[22]、雅鲁藏布江流域^[23]、塔里木盆地^[24]等不同区域研究中得到广泛应用,并取得丰富成果。风蚀气候侵蚀力采用联合国粮农组织改进的计算公式^[25]:

$$C = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} u_i^3 \left(\frac{ETP_i - P_i}{ETP_i} \right) d \quad (1)$$

式中: u_i 为第*i*月2 m高度平均风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); ETP_i 为第*i*月潜在蒸发量(mm); P_i 为第*i*月降水量(mm); d 为月天数;

式(1)中所采用风速为2 m高度风速,但气象站的风速计通常在10 m高度,两者之间的换算公式如下:

$$u_2 = u_{10} \frac{4.87}{\ln(67.8 \times 10 - 5.42)} \quad (2)$$

式中: u_2 为2 m高度风速, u_{10} 为10 m高度风速。

使用气温、相对湿度等数据,计算月潜在蒸发量^[26]:

$$ETP_i = 0.19(20 + T_i)^2(1 - r_i) \quad (3)$$

式中: T_i 为月平均气温($^{\circ}\text{C}$); r_i 为月平均相对湿度(%)。

1.2.1.2 沙丘活化指数(M)

沙丘活化指数由Lancaster^[27]提出,是风力、降水、气温条件的综合指标,能够表达沙丘的潜在活化程度,为区域风沙防治提供依据^[15, 28]:

$$M = W / (P_M / P_E) \quad (4)$$

式中: W 为风力因子; P_M 为降水因子; P_E 为蒸散发因子。 W 为关于月平均风速的函数 $W \propto u^3$; P_M 取当月与前月降水量的均值,以表达降水对土壤风蚀影响的延迟效应^[29],即:

$$P_M = (P_{-1} + P_0) / 2 \quad (5)$$

式中: P_{-1} 为前月降水量(mm); P_0 为当月降水量(mm)

P_E 根据Thornthwaite公式计算获得^[30],其表达式为:

$$P_E = 1.6(L/12)(N/30)(10T/I)^a \quad (6)$$

式中: L 为各月的日照时间(h); N 为各月天数(d); T 为月平均气温($^{\circ}\text{C}$),小于0按0计; I 为热量指数; a 为关于 I 的系数。

1.2.1.3 输沙势(DP)

输沙势是用来衡量区域风沙活动强度的重要指标之一,反映风速统计中某一方位风在一定时间内搬运沙的能力,又称为输沙风能。目前输沙势计算比较通用的公式为 Fryberger 选用的莱托方程^[20],即:

$$DP = u^2(u - u_t)t \tag{7}$$

式中:DP为潜在输沙率,即输沙势(矢量单位:VU);*u*为风速(节);*u_t*为起沙风速(节,1节≈0.5 m·s⁻¹)。不同的案例区域,受沙粒粒径和植被覆盖度等因素的影响,起沙风速有所差异,其中,兰新高铁路段途径烟墩风区与百里风区,均为戈壁大风区,依据沿线实测起沙风速^[31-32],确定 RX2828 起沙风速为 8 m·s⁻¹,RX3010 为 12 m·s⁻¹,其余案例均为 5 m·s⁻¹^[33]。*t*为起沙风时间(次数),用观测时段内所观测的起沙风时间数与总观测时间数的百分比表示。根据统计的 16 个方位的起沙风频率,计算每个方位的输沙势,根据矢量合成法则将 16 个方位输沙势进行合成,得到合成输沙势(RDP)和合成输沙势方向(RDD),以反映一个地区潜在输沙能力大小,合成输沙势与输沙势的比值(RDP/DP)为方向变率指数,用来反映一个地区的风向组合情况和风信复杂程度。

1.2.2 数据来源

沙丘活化指数与风蚀气候侵蚀力计算过程中,所用的指标包括月平均风速、降水量、平均气温和平均相对湿度。对所选工程案例段就近选取气象站获取数据资料。其中,包兰铁路案例段采用宁夏沙坡头沙漠生态系统国家野外科学观测研究站所得数据集(<http://spd.cern.ac.cn/meta/metaData>),时间序列为 2005—2014 年;其余工程案例段数据均来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn>),时间序列为 1993—2012 年。输沙势计算过程所需风速和风向观测数据,主要来源于所选防沙工程点布设的 HOBO 自动气象仪的观测记录数据,观测高度距离地面 2 m,民湖公路南段采用甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站所得数据集(<http://mqd.cern.ac.cn/meta/metaData>)。气象数据站点与风速数据详细时间序列见表 2。

2 结果与分析

风蚀气候侵蚀力是潜在风力侵蚀强度的重要表征^[34],沙丘活化指数可定量评估沙丘的潜在活性

表 2 气象数据来源说明		
Table 2 Introduction of data sources		
工程案例段	就近选取的气象站	HOBO 自动气象仪数据时间
RB707/RB709	沙坡头	2010-06-01—2020-05-31
M	民勤	2014-01-01—2016-12-31
RL745	额济纳旗	2019-07-01—2020-07-01
RL420		2019-11-10—2020-11-10
RT25		2019-11-10—2020-08-27
S19/S23		2016-06-01—2017-05-31
RD77	敦煌	2016-06-10—2017-05-31
RX2828	哈密	2018-01-01—2018-12-31
RX3010		2016-01-01—2016-12-31
RH105/RH107/RH109		2018-04-01—2019-03-30

程度^[15],输沙势表征某区域的风在一定时间内搬运沙的能力^[20]。由以上 3 种指标的性质可知其数值越大,风沙活动强度越大,风沙危害发生的可能性越高,反之,则越低。总体而言,3 种指标在不同区域工程案例的变化趋势较为一致,但相互间的对应关系存在多种情况(图 3)。

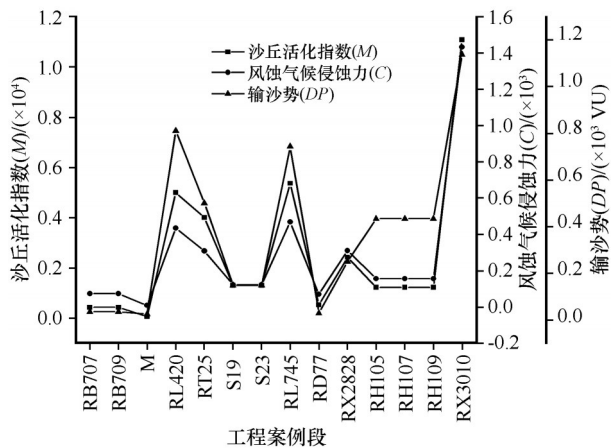


图 3 工程案例区段 3 种指标风沙活动强度
Fig.3 Distribution of three intensity of blown-sand activity indexes in Engineering Cases

2.1 计算结果的一致性

RX3010、RX2828、S19 和 RD77 段 3 种指标对区域风沙活动强度估算结果一致,但实地调查发现,4 个地点的实际风沙危害程度差异较大。RX3010 段 3 种指标在所有工程案例中数值最大,表征风沙活动强度高,极易造成严重风沙危害,但该段输沙/砾通量实际上小于 RX2828 段^[31],与指标计算结果

不同。这是由于该路段地处广袤的戈壁区,尽管风力超强,但由于地表砾石覆盖度高(图4A),沙源相对不足,风沙危害程度较低,而RX2828段指标计算

结果数值中等,但此路段途经流动沙地和半固定沙地的活化灌丛沙堆^[32](图4B),可在铁路线路上形成数十厘米厚的积沙。

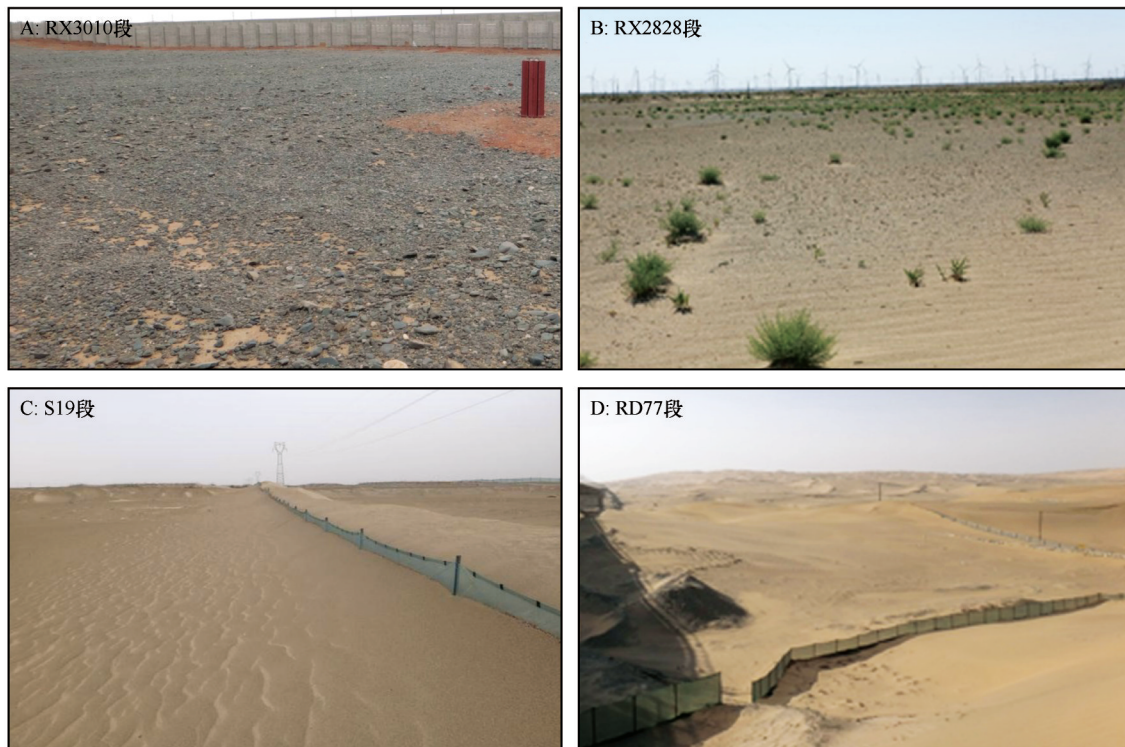


图4 不同工程案例的地表覆盖状况

Fig.4 The surface coverage in different engineering cases

S19段的3种指标在所有工程案例中数值较小,表征风沙活动强度较低,风沙危害应当较小,但工程防护体系内积沙情况严重,积沙厚度最高时可达1 m,影响道路通车,导致此现象的原因是该路段两侧有大量的活化沙丘,可提供充足的沙物质(图4C)。类似地,RD77段的指标计算结果较小,表征风沙活动强度低,但其穿过库姆塔格沙漠东端,沙源丰富,降水稀少,植被稀疏,植被覆盖度低(图4D),风沙危害严重,与风沙活动强度计算结果不符。这两个案例说明,沙源是导致相近风沙活动强度条件下风沙危害程度显著差异的主要因素。

2.2 计算结果的相对准确性

RT25、RL420、RL745和RH107段的计算结果中,输沙势表征的风沙活动强度最大,其次是沙丘活化指数,最后是风蚀气候侵蚀力,各指标间的差异明显。对比工程案例实际风沙灾害状况发现,RT25段为开阔砂砾质戈壁区,分布有大面积流动沙丘,路基上存有积沙(图5A),RL420段和RL745段

途径砂砾质戈壁和风蚀宽谷的松散细物质^[35],沿线沙源丰富,铁路线路上同样存在积沙现象(图5B、C),表征此处风沙活动强度高,风沙危害大;RH107段所经地区,大风频繁,地表基本无植被,呈现荒漠戈壁景观,地表细颗粒土被吹蚀搬运,致使防护体系内积沙厚0—0.5 m,局部可达1 m,风沙活动强度高,对路基造成极大威胁(图5D)。输沙势表征的风沙活动强度结果高于风蚀气候侵蚀力和沙丘活化指数,工程受到的实际风沙灾害都较为严重,表明在降水稀少的极端干旱地区,3种指标计算结果虽然整体趋势较为一致,但根据高精度风速风向数据得出的输沙势指示意义更加明显。

RB707、RB709和M工程案例段,整体上3种指标的数值在全部案例段中偏小,其中输沙势最低,RB707、RB709段为83.68 VU,M段输沙势为24.79 VU,表征风沙活动强度低,风沙灾害发生可能性小(图6)。实际发现,此3个案例防护工程体系稳定,线路畅通,与计算结果较为吻合。由图2可知,这3个工程所处的中卫和民勤地区,虽然仍然属于干旱



图 5 工程案例路段的沙害现状
Fig.5 The present situation of sand damage

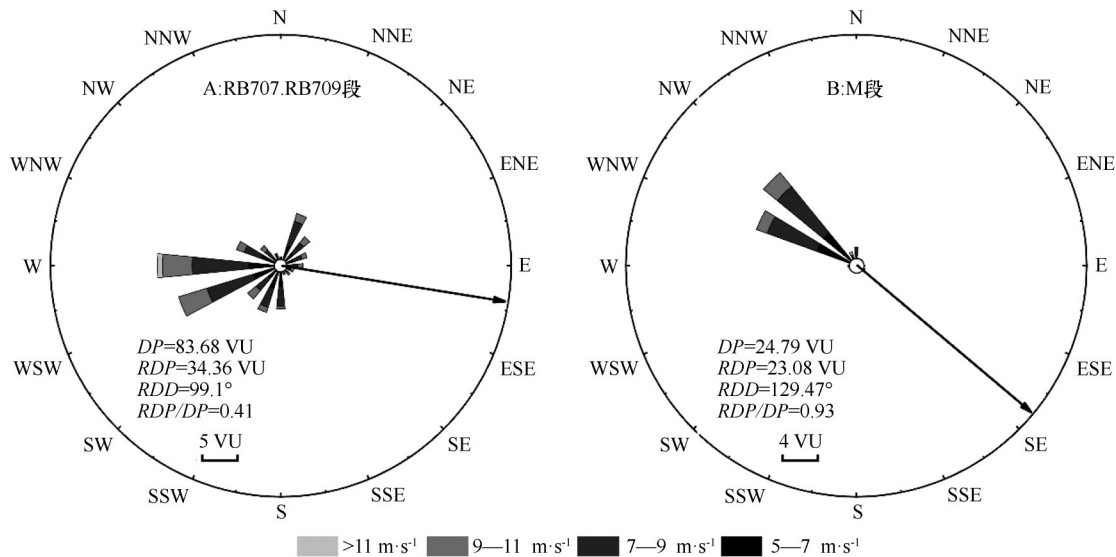


图 6 RB707、RB709 段和 M 段输沙势玫瑰图
Fig.6 Roses of sand transport potential in RB707, RB709 and M sections

区,但降水量远高于其他地点。这说明在降水较多的地区,风沙活动程度相对较低,所选用的 3 种指标均可较好地评估当地的风沙活动强度,但沙丘活化指数和风蚀气候侵蚀力考虑的参数更全面。

2.3 计算结果的工程线路的方向差异性

在沙区交通沿线,同一个区域依据风力资料得

出的风沙活动强度一般只有一个数值,但由于交通线路走向和线路本身的阻挡作用,线路两侧的实际风沙状况可能存在较大差别;在野外实际考察中,同一条线路工程两侧风沙灾害状况有显著差异,例如 RT25 段,西侧风沙活动强度高于东侧(图 7)。为对比同一工程不同侧别的风沙活动强度,分别选取工程两侧上风向的 9 个方位的输沙势,根据矢量合

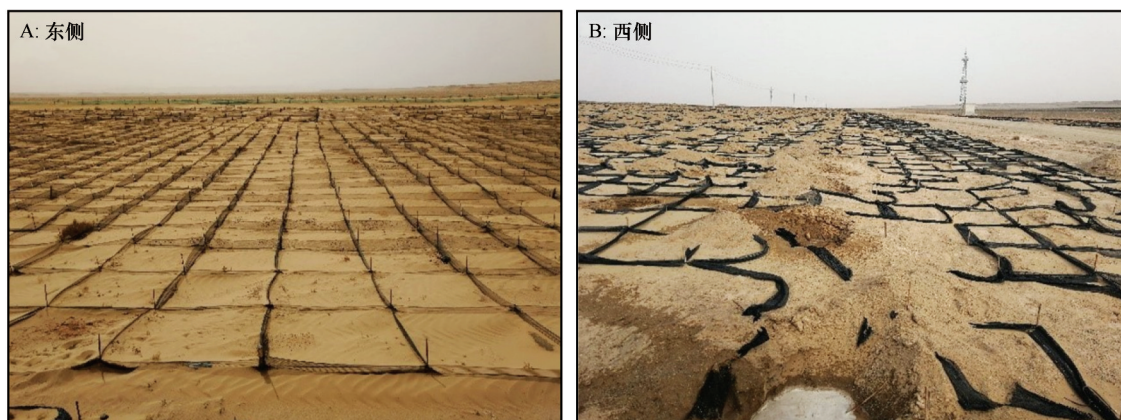


图7 RT25段线路两侧沙害现状

Fig.7 The sand damage of Section K25 of Tianchu-Ceke Railway

成法则得到两侧的合成输沙势(RDP)。因为所选线路存在偏东西和偏南北两种走向,故根据工程走向按东侧/南侧、西侧/北侧进行计算。

由图8可以看出,同一个工程案例两侧的输沙势存在不同程度的差异。在所选的工程中,整体上呈现出西侧/北侧大于东侧/南侧的趋势,与中国北方地区西北风偏多、风速更大的情况一致。其中, RB707、RB709、RD77和M段两侧输沙强度十分接近,其他路段两侧差异均十分明显,最大差异出现在RX3010段,此处输沙势两侧相差90多倍,差值为1 133.91 VU。

这说明在实际的工程应用中,同样的防护体系,在线路两侧会有截然不同的防护效果。在进行风沙活动强度评估、指导防护体系建设时,所用指

标应能反映工程走向导致的风沙活动强度差异,但目前除输沙势以外,大多数指标中并没有表达风向的参数。

3 讨论

受植被覆盖度和沙源的影响,几种指标计算的风沙活动强度与实际的风沙危害程度不一定对应,例如RX3010段的指标数值最高,但沙害程度比RX2828低。中国沙区面积广阔,不同区域沙源与地表覆盖因子有显著差别,戈壁砾石、植被起到显著的稳定地表、阻截流沙等作用^[36]。因此,在沙源丰富程度与植被覆盖度大致相同的地区,采用本文所选的3种指标结果较为一致。

在年降水量少于50 mm的极端干旱地区,输沙势的计算结果更高,表征风沙活动强度的能力更加灵敏,如RT25、RL420、RL745和RH107段;但在年降水量大于100 mm的一般干旱地区,如RB707、RB709和M段,降水、气温等其他要素的影响显著,输沙势计算结果比另两个指标低。这说明输沙势考虑的因子单一,估算结果较为局限,而沙丘活化指数和风蚀气候侵蚀力计算过程使用风速、降水和气温等多个气象数据,考虑的参数更全面。

所选线路两侧的风沙活动和沙害情况存在显著差异,月平均风速最大的RX3010段,两侧输沙势差异最高可逾90倍。在实际的风沙活动强度评估工作时,高精度的风速风向数据不易获取,往往需要重新架设观测仪器;而风蚀气候侵蚀力和沙丘活化指数计算涉及的月平均气温、降水量等要素可以通过就近气象站获得长期资料,计算结果也具有一定的实用性,但不能考虑风沙活动的方向性。因

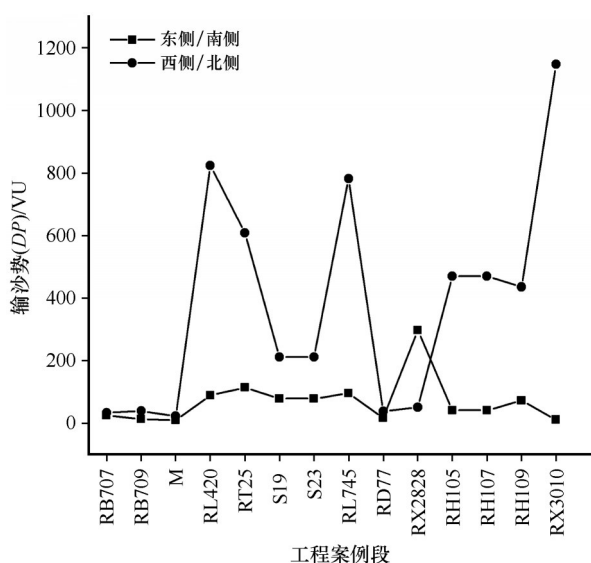


图8 工程案例不同侧输沙势

Fig.8 Sand drift potential on different sides of the engineering cases

此,应考虑结合3种指标的优点,同时注意地表沙源特点及工程走向,提出一种能够更加全面反映气候特征、沙源丰富程度、风沙活动方向性的指标。

4 结论

在不同的气候区,沙丘活化指数、风蚀气候侵蚀力、输沙势3种估算指标反映的风沙活动强度总体趋势较为一致,其中输沙势在极端干旱地区更加灵敏,但其考虑的要素单一,在降水相对较多的区域较为局限。

受沙源丰富程度和植被覆盖度等因素的影响,风沙活动强度估算结果与实际的风沙危害程度可能存在明显差异。

工程两侧的风沙活动强度和风沙危害存在巨大差异,尤其是风速较大的地区,但目前除输沙势以外的大多数指标不能反映该差异。

因此,开展具体工程的风沙活动强度估算和风沙危害防护工程设计,应结合沙丘活化指数、风蚀气候侵蚀力、输沙势等3种指标各自的优势,考虑风速、降水、气温等多种气候参数,同时结合实地沙源丰富程度、植被覆盖度和工程走向的差异,提出一种准确度高、适用性广、可操作性强的风沙活动强度新指标,使其既能表达长期气候特征,又能反映局地工程特点,从而为合理建设风沙防治工程提供指导。

参考文献:

- [1] 张克存,屈建军,鱼燕萍,等.中国铁路风沙防治的研究进展[J].地球科学进展,2019,34(6):573-583.
- [2] 刘刚,高海男.沙漠地区公路风沙病害分析及处治措施研究[J].公路,2018,63(4):57-59.
- [3] 李生宇,雷加强,徐新文,等.中国交通干线风沙危害防治模式及应用[J].中国科学院院刊,2020,35(6):665-674.
- [4] 蔡迪文,张克存,安志山,等.青藏铁路格拉段风动力环境及其对铁路沙害的影响[J].中国沙漠,2017,37(1):40-47.
- [5] 鲍锋,董治宝.青藏铁路察尔汗盐湖段风沙活动特征[J].中国沙漠,2017,37(4):621-625.
- [6] 徐峻岭,裴章勤,王仁化.半隐蔽式麦草方格沙障防护带宽度的探讨[J].中国沙漠,1982,2(8):16-23.
- [7] 韩致文.风沙危害防治的主要工程措施及其机理[J].地理科学进展,2004,23(1):13-21.
- [8] 张克存,屈建军,姚正毅,等.青藏铁路格拉段风沙危害及其防治[J].干旱区地理,2014,37(1):74-80.
- [9] 冯连昌,卢继清.中国沙区铁路沙害防治综述[J].中国沙漠,1994,14(3):47-53.
- [10] 李晋昌,苏志珠,胡光印.风沙活动强度的常用判断指标及其应用评述[J].中国沙漠,2010,30(4):788-795.
- [11] 陈首序,董玉祥.风蚀气候侵蚀力研究进展[J].中国沙漠,2020,40(5):67-75.
- [12] 钱正安,蔡英,刘景涛,等.中国北方沙尘暴研究的若干进展[J].干旱区资源与环境,2004,18(1):1-8.
- [13] 李晋昌.中国北方大气降尘的时空变化[D].兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,2008.
- [14] 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.
- [15] 管超.基于改进的M指标的沙丘潜在活性评价:以库布齐沙漠为例[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(3):21-29.
- [16] 凌裕泉.铁路沙害治理体系的风沙物理学原理:以包兰铁路为例[M]//中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠可持续研究站.腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究.银川:宁夏人民出版社,1991:297-308.
- [17] 胡孟春,赵爱国,李农.沙坡头铁路防护体系阻沙效益风洞实验研究[J].中国沙漠,2002,22(6):76-79.
- [18] 王训明,陈广庭.塔里木沙漠公路沿线机械防沙体系效益评价及防沙带合理宽度的初步探讨[J].干旱区资源与环境,1997,11(4):28-35.
- [19] 冯连昌,钱征宇.论草方格沙障防风原理与其防护带宽度的计算公式[C]//全国风工程及工业空气动力学学术会议.1986.
- [20] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003:93-94,385-386.
- [21] 牛清河,屈建军,安志山.甘肃敦煌雅丹地质公园区风蚀气候侵蚀力特征[J].中国沙漠,2017,37(6):1066-1070.
- [22] 祁栋林,韩廷芳,赵全宁,等.青海省冬春季风蚀气候侵蚀力和起沙风日数的区域变化差异特征[J].水土保持研究,2019,26(2):23-36.
- [23] 刘慧,李晓英,肖建华,等.1961~2015年雅鲁藏布江流域风蚀气候侵蚀力变化[J].地理科学,2019,39(4):688-695.
- [24] 杨兴华,何清,李红军,等.塔里木盆地风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J].中国沙漠,2012,32(4):990-995.
- [25] FAO. A Provisional Methodology for Soil Degradation Assessment[M]. Rome, Italy: FAO, 1979.
- [26] 董玉祥,康国定.中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J].水土保持学报,1994,8(3):1-7.
- [27] Lancaster N. Development of linear dunes in the southwestern Kalahari, Southern Africa [J]. Journal of Arid Environments, 1988, 14(3):233-244.
- [28] 柳本立,张巍.1957—2014年翁牛特旗气候要素和沙丘活化指数的变化[J].水土保持通报,2017,37(1):270-280.
- [29] Wang X, Yang Y, Dong Z B, et al. Responses of dune activity and desertification in China to global warming in the twenty-first century [J]. Global & Planetary Change, 2009, 67(3/4): 167-185.
- [30] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate [J]. Geographical Review, 1948, 38(1):55-94.
- [31] 王涛.兰新高铁戈壁大风区风沙灾害形成机理及防治研究[D].北京:中国科学院大学,2018.
- [32] 谭立海,张伟民,边凯,等.兰新高铁烟墩风区戈壁近地表风

- 沙流跃移质垂直分布特性[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 919-927.
- [33] 包为民. 沙土含水率对起沙临界风速影响[J]. 中国沙漠, 1996, 16(3): 316-319.
- [34] Skidmore E L. Wind erosion climatic erosivity [J]. Climatic Change, 1986, 9(1): 195-208.
- [35] 韩庆杰, 郝才元, 张宏杰, 等. 临哈铁路典型防沙工程区阻风效率与积沙量特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 1-10.
- [36] 慕青松, 马崇武, 陈晓辉. 颗粒状粗糙元对可蚀性地表的保护作用[J]. 工程力学, 2008, 25(3): 211-215.

Applicability of three indexes for estimating the intensity of blown-sand activity

Wang Zhaoyun^{1,2}, Niu Gaihong^{1,2}, Liu Benli¹

(1. Key Laboratory of Desert and Desertification / Dunhuang Research Station of Gobi and Desert Ecology and Environment, 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: For the construction and operation of transportation and energy infrastructure in sandy area, the intensity of blown-sand activity is an important index that should be considered in designing wind-blown sand control engineering. However, currently there is no easily and widely adopted method to calculate this intensity. In this study, three commonly used indicators, namely wind erosion climatic erosivity, dune activity index and sand drift potential, were selected to compare and analyze the suitability and existing problems of each index after referring multiple specific engineering cases in North China. The results are as follows. (1) Without considering the relevant factors affecting the availability of sand sources around the engineering, such as the coverage of vegetation and gobi gravel, the three indicators cannot reflect the actual wind and sand problems of specific engineering. (2) The sand drift potential calculated using high-precision wind speed and direction data can better express the wind characteristics in arid areas, but its deviation is larger in regions with more precipitation. (3) Significant differences in the intensity of blown-sand activity may exist on two sides of linear engineering such as railways, and there are obvious differences in the protection effects of the same sand control measure. The difference of direction should be made clear when estimating the intensity of blown-sand activity for a specific project. When guiding the construction of the protection system, it is necessary to consider as many climatic factors as possible, such as precipitation, air temperature, wind speed and wind direction. The difference of sand activity intensity, the availability of sand source, the surface coverage, and engineering trend should be take into account together. The study is helpful to propose a method for estimating the intensity of blown-sand activity with high accuracy, wide applicability and good operability in the future, which will provides guidance for the effective design of sand control engineerings.

Key words: the intensity of blown-sand activity; wind erosion climatic erosivity; dune activity index; sand drift potential