

张晨亮,陶淘,周成龙,等.塔克拉玛干沙漠粉尘释放通量研究[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(3):143-149.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2024.03.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



塔克拉玛干沙漠粉尘释放通量研究

张晨亮¹,陶 淘^{2*},周成龙³,蒋聚金⁴

(1.新疆气象技术装备保障中心,新疆 乌鲁木齐 830002;2.新疆气象信息中心,新疆 乌鲁木齐 830002;
3.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐 830002;4.库尔勒市人工影响天气办公室,新疆 库尔勒 841000)

摘 要:土壤风蚀产生的粉尘颗粒物严重影响空气环境质量,为了探明粉尘释放规律,有必要研究不同高度层风速和摩阻风速对粉尘释放通量的影响机制。通过分析塔克拉玛干沙漠观测站不同高度层风速和平均摩阻风速,利用 DPM 模型计算粉尘释放通量,综合分析摩阻风速与粉尘释放通量的相互关系。结果表明:(1)不同观测日不同高度层的风速变化各不相同,2 m 高度层风速的变化范围是 0.05~7.73 m/s,4 m 高度层风速的变化范围是 0.09~7.19 m/s,10 m 高度层风速的变化范围是 0.5~8.09 m/s。(2)4 月 1 日—30 日各个观测日 24 h 内平均摩阻风速分别为 0.42、0.34、0.27、0.34、0.16、0.32 m/s,变化范围为 0.16~0.42 m/s。(3)DPM 模型研究发现实测跃移通量约为模拟值的 129%,模拟值与实测值相关性较好, R^2 为 0.91。

关键词:DPM 模型;土壤风蚀;塔克拉玛干沙漠;摩阻风速

中图分类号:X169

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2023)06-0143-07

土壤风蚀是土壤表层在风力作用下发生剥蚀及分选直至搬运,最终造成土壤细颗粒物流失,引起土壤整体性能下降的现象^[1]。它对沙尘暴的贡献率高达 20%^[2],近 30% 土地面临着土壤风蚀的危害^[3]。土壤风蚀产生的沙尘气溶胶,不仅减少沙漠地区地表反照率,漂浮在大气中还可通过与太阳短波和地气长波辐射调节辐射收支,进而影响云量和气候^[4-5]。

土壤风蚀模拟和预测常借助土壤风蚀模型,国内外学者对此开展了大量研究并取得了丰硕成果^[6-7]。例如,Bagnold 最早提出的输沙率公式,用于研究风力对土壤风蚀的影响^[8]。随后,WEQ 风蚀方程诞生^[9]。风蚀方程不断地被各国科学家“修订—验证—应用”,产生了众多风蚀模型;具有代表性的有 Pasak 模型^[10]、Bocharov 模型^[11]、德克萨斯侵蚀分析模

型(Team)^[12]、风蚀预报系统(WEPS)^[13]和修正风蚀方程(RWEQ)^[14]等。国内学者利用上述模型对我国北方土壤风蚀区开展了研究,反演不同季节土壤风蚀模数、不同季节风蚀差异等^[15-16];也有利用风蚀模型进行不同影响因素分析和风蚀控制效益的研究^[17-18],上述研究成果对我国土壤风蚀防治提供了支撑^[19-23]。然而,土壤风蚀是随着所处环境条件发生改变而变化,对其驱动因素和主要过程不同模型所得结论各不一样,常用的土壤风蚀模型具有一定的局限性^[24]。

近年来,数值模拟逐渐成为研究粉尘释放的一种重要手段^[25-32]。DPM 模型在描述颗粒间作用力及粉尘释放研究方面具有较高的精度,是国际上公认的较为成熟的粉尘释放模型。梅凡民等^[33]在毛乌素沙地进行了野外试验观测与验证,发现 DPM 模型可以模拟中国裸露沙质地表粉尘释放通量;车慧正等^[34]利用 DPM 模型模拟计算发现该模型是符合中国沙漠地区不同的地表状况下粉尘释放通量的物理模型。土壤风蚀产生的粉尘颗粒物主要有积累型和输送型,在不利于扩散的气象条件下聚集,导致粉尘

收稿日期:2022-05-06;修回日期:2023-10-11

基金项目:自治区科技计划面上项目2022年第二批(2022D01A366)

作者简介:张晨亮(1977—),男,工程师,主要从事气象装备计量检定工作。E-mail:57504395@qq.com

通信作者:陶淘(1988—),男,工程师,主要从事气象信息技术开发与服务。E-mail:717770274@qq.com

颗粒物浓度升高,能见度下降^[25]。荣双等^[26]采用DPM模型研究风向对街谷内颗粒物扩散的影响,发现不同风向对颗粒物浓度的扩散规律不同,街谷壁面颗粒物积累浓度最小;谢海英等^[27]研究不同风向对长宽比一定的街道峡谷内污染物扩散的影响,表明90°风向下颗粒物浓度最大。

本文利用DPM模型对塔克拉玛干沙漠土壤风蚀与粉尘释放通量的互相关系进行研究,提高粉尘释放模型的计算精度,探明粉尘释放规律、改善空气质量。

1 研究区与方法

1.1 研究区及试验观测

塔克拉玛干沙漠地处塔里木盆地中央,深居欧亚大陆腹地,东西长约1 200 km,南北宽600 km,面积约34万km²。主要以流动沙丘为主,占沙漠总面积的84%。沙丘类型主要为新月形沙丘、横向沙丘、抛物线沙丘等。年均气温1月为-5~10℃,夏季7月为25~27℃。年平均降水量为20~70 mm,其中降水最小年份仅为10 mm,年蒸发量均值为2 000~3 000 mm。年平均风速为1.5~3.0 m·s⁻¹,春、夏季略偏高,多在2.0~3.5 m·s⁻¹^[28]。塔克拉玛干沙漠主要以裸露的流沙地表为主,植被分布覆盖度呈现种类贫乏、群落结构简单、覆盖度极低的特征。年均沙尘暴天数约为30 d、有些年份多至60 d,浮沉天气约200 d、持续时间长达7个月^[29-31]。

试验观测场位于塔克拉玛干沙漠腹地,观测气象塔装有5层风、温、湿传感器及风向仪,高度为0.5、1、2、4、10 m。观测时间选取沙尘发生较为集中的4月,以30 min一组数据存储,每分钟得到超过20%以上的数据后才能被统计为分钟值,每分钟少于50%的数据时记录为缺测,所有数据都由梯度气象站CR1000-2M型数据采集器自动搜集。风速随着高度的增高而增大,粗糙度和摩阻风速度受风速影响较大。因此,选取观测日内4月1日、10日、15日、20日、25日、30日具有代表性的风速,可为探究其规律提供数据支撑。

1.2 研究方法

1.2.1 粉尘释放通量计算

DPM模型常被用来模拟研究粉尘释放问题^[32-33],本文利用该模型计算塔克拉玛干沙漠土壤风蚀引起的粉尘释放通量。模型由跃移通量方程与粉尘释放通量方程组成。理论依据是粉尘释放通量和跃移通量与颗粒动能成正比,即粉尘释放过程可简化为微

团粒在风力作用下发生跃移,跃移过程中由此产生颗粒碰撞,碰撞时消耗各自的动能,动能的大小决定粉尘释放通量的多寡。尽管该模型存在缺陷,但其输入参数少且易确定,同时考虑了地表特征和跃移及冲击过程对粉尘释放的影响,具备明确的物理机制。

粉尘跃移通量方程为:

$$F_h = \frac{C \cdot \rho_a}{g \cdot U^3} \int_{D_p} (1+R)(1-R^2) dS_{en}(D_p) dD_p, \quad (1)$$

粉尘释放通量方程为:

$$F_{dust,i} = \frac{\pi \rho_p d_i^3}{6 \cdot N_i}. \quad (2)$$

式中: F_h 为粒径大小为 D_p 的可蚀性土壤水平跃移通量,单位为 $g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$; C 为经验值,主要表征地表特征土壤风蚀的限制情况,不同地表取不同的值; ρ_a 为空气密度,通常取值为 $0.001\ 29\ g \cdot cm^{-3}$; U 为摩阻风速,单位为 cm/s ; R 为常数; $dS_{en}(D_p)$ 为粒径 D_p 的颗粒所占整体的比例,主要取决于可蚀性组分的粒径分布; D_p 为粒径 $<2\ 000\ \mu m$ 的颗粒直径; N_i 为第 i 种粉尘粒子; $F_{dust,i}$ 为第 i 种粉尘粒子的释放通量,单位为 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$; ρ_p 为土壤微团粒的平均密度,一般取 $2.65\ g \cdot m^{-3}$; d_i 为从第 i 个对数正态分布记,粉尘颗粒的质量中值粒径,单位: μm 。

1.2.2 摩阻风速计算

摩阻风速计算采用风速廓线对数法:

$$U(z) = \frac{U^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right). \quad (3)$$

式中: $U(z)$ 为高度 z 处的风速; k 为卡门常数,通常取0.4; z_0 为空气动力学粗糙度; U^* 为摩阻风速。

平均摩阻风速 $\bar{U}_i^*$ 为2、4、10 m高度摩阻风速计算值的平均。

$$\bar{U}_i^* = \frac{(U_{2,i}^* + U_{4,i}^* + U_{10,i}^*)}{3}. \quad (4)$$

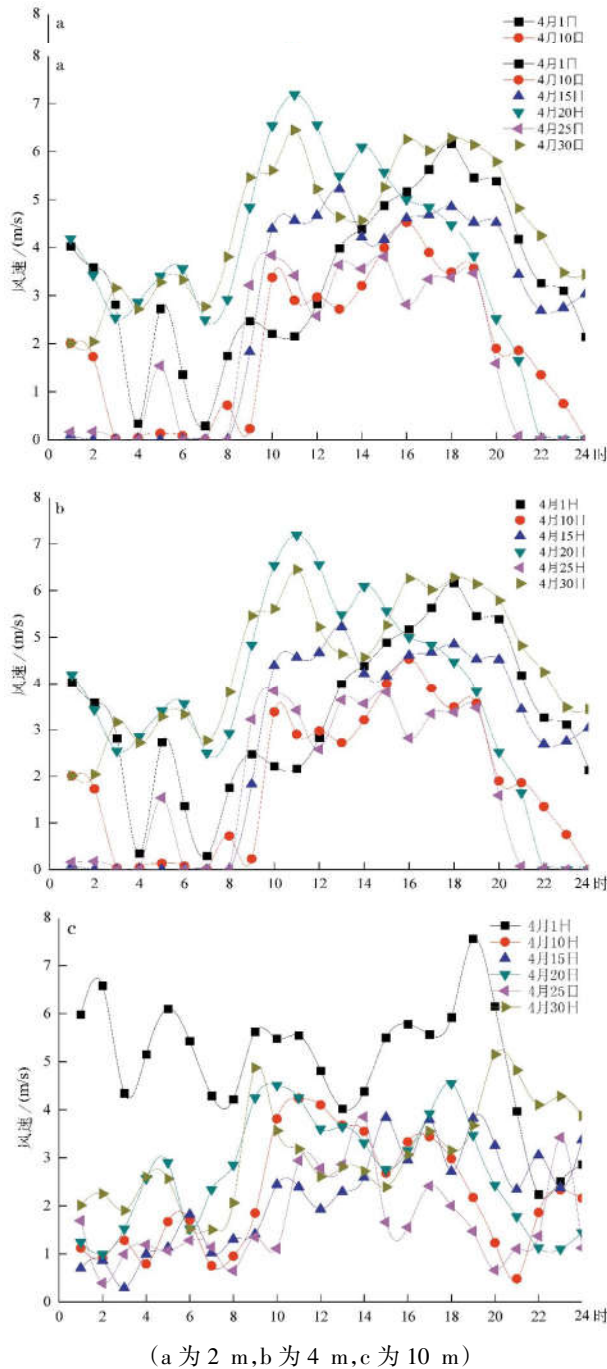
式中: $U_{2,i}^*$ 、 $U_{4,i}^*$ 、 $U_{10,i}^*$ 分别指2、4、10 m高度处风速计算的摩阻风速。

2 结果与分析

2.1 不同高度层风速及平均摩阻风速分析

图1为典型观测日2、4、10 m高度的风速随时间序列变化趋势。各个高度层不同观测日风速均呈现波动变化趋势,最大值出现在12时,约为7.5 m/s,4月20日风速较其他观测日大。2 m高度层风速的变化范围是0.05~7.73 m/s,4 m高度层的变化范围是0.09~7.19 m/s,10 m高度层的变化范围是0.5~8.09 m/s。2、4 m高度层内,观测日风速变化大小依次为4月20日、30日、15日、25日、1日、10日;10 m

高度处风速变化范围大小依次为4月1日、30日、20日、10日、15日、25日。随着观测高度层的增加,风速廓线变化较复杂,2、4 m高度层风速廓线在观测日内呈现下旬风速变化大于上旬风速变化。



采用步长为 30 min 的平均值,利用式(3)和式(4)计算观测日 2、4、10 m 高度层的平均摩阻风速(表1),4月1日平均摩阻风速变化范围是 0.12~0.91 m/s,05—06 时达最大值;10 日平均摩阻风速的变化范围是 0.11~0.9 m/s,19—20 时达到最大值;15 日平均摩阻风速的变化范围是 0.08~0.65 m/s,06—

07 时达最大值;20 日平均摩阻风速的变化范围是 0~1.75 m/s,21—22 时达最大值;25 日平均摩阻风速的变化范围是 0~0.73 m/s,22—23 时达最大值;30 日平均摩阻风速的变化范围是 0.1~0.61 m/s,21—22 时达最大值。平均摩阻风速在不同观测日内有 2 个时间段出现最大值,即 06 时和 22 时左右。4 月 1 日—30 日各个观测日 24 h 平均摩阻风速分别为 0.42、0.34、0.27、0.34、0.16、0.32 m/s,变化范围为 0.16~0.42 m/s。平均摩阻风速大于该值时,地表的土壤微团粒才会发生跃移、碰撞,进而导致地表粉尘释放。本文计算的塔克拉玛干沙漠起动摩阻风速为 0.21 m/s。不一定每个观测日内的平均摩阻风速都会达到起沙摩阻风速,即每次观测不一定都有粉尘释放现象。

表 1 4 月不同观测日平均摩阻风速

观测时间	1 日	10 日	15 日	20 日	25 日	30 日
	平均摩阻风速/(m/s)					
0:00—1:00	0.59	0.51	0.34	0.31	0.27	0.39
1:00—2:00	0.87	0.63	0.32	0	0.01	0.52
2:00—3:00	0.99	0.15	0.09	0	0	0.35
3:00—4:00	0.29	0.61	0.33	0.49	0.3	0.55
4:00—5:00	0.81	0.23	0.25	0.45	0	0.5
5:00—6:00	0.91	0.27	0.43	0	0.48	0.18
6:00—7:00	0.22	0.34	0.65	0.55	0	0.43
7:00—8:00	0.41	0.55	0.35	0.25	0.27	0.25
8:00—9:00	0.31	0.08	0.12	0.21	0.06	0.35
9:00—10:00	0.17	0.11	0.08	0.47	0.02	0.13
10:00—11:00	0.43	0.14	0.16	0.18	0.15	0.26
11:00—12:00	0.34	0.11	0.08	0.14	0.15	0.19
12:00—13:00	0.17	0.15	0.11	0.18	0.14	0.09
13:00—14:00	0.19	0.08	0.16	0.22	0.19	0.13
14:00—15:00	0.12	0.25	0.14	0.16	0.02	0.06
15:00—16:00	0.24	0.16	0.14	0.16	0.11	0.1
16:00—17:00	0.32	0.23	0.15	0.26	0.09	0.18
17:00—18:00	0.3	0.16	0.14	0.22	0.08	0.18
18:00—19:00	0.48	0.26	0.24	0.29	0.07	0.21
19:00—20:00	0.67	0.89	0.27	0.59	0.04	0.38
20:00—21:00	0.43	0.51	0.38	1.14	0.38	0.54
21:00—22:00	0.28	0.48	0.55	1.75	0.21	0.61
22:00—23:00	0.3	0.46	0.47	0.22	0.73	0.53
23:00—00:00	0.32	0.9	0.57	0	0.11	0.47

2.2 土壤风蚀区粉尘释放通量计算

DPM 模型计算的粉尘释放通量值与平均摩阻风速呈线性关系(图 2),即随着平均摩阻风速的增加,粉尘释放通量模拟值也在逐渐增加,与前人的研究结果一致^[34]。在大气中性层结下,根据风廓线方程及粗糙度、风速和摩阻风速的关系可知,在粗糙度不变的情况下,地表风速越大,摩阻风速越大,模拟的粉尘释放通量也随之增大。从图 2 可知,二者相关系数仅为 0.51,可能是因为塔克拉玛干沙漠由若干不同下垫面组成,导致不同下垫面风速不同,进而各点的摩阻风速也不同,但大尺度上总体变化趋势一致。有些时刻的粉尘释放模拟值为零,说明该时间段内的平均摩阻风速小于起动摩阻风速,从理论上讲便没有粉尘释放。摩阻风速是粉尘释放极其重要的影响因素之一。

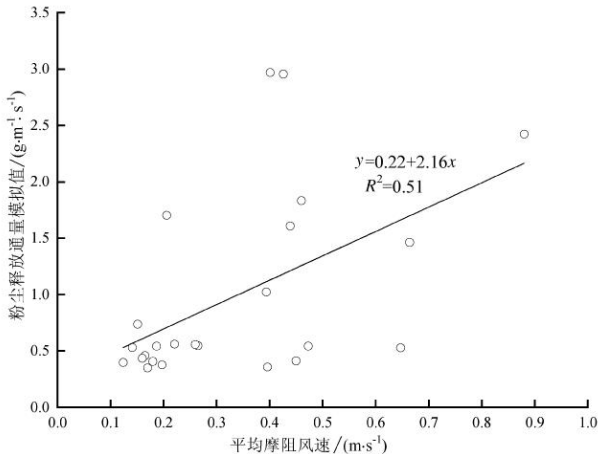


图 2 平均摩阻风速与粉尘释放通量的相关性

由图 3 可知,实测跃移通量约为模拟值的 129%,即模拟值与实测值相关性较好, R^2 值为 0.91。模拟值偏低是由于计算跃移量时没有考虑输沙过程中沙粒之间的互相碰撞对跃移通量的贡献量。本文采用的 DPM 粉尘释放模型在预测跃移通量和实测值之间有较好的一致性,证明该模型估算平坦沙地的输沙率是可靠的。

比较跃移通量的实测值和 DPM 模型计算的粉尘释放通量值发现,计算值较高,但与观测值在同一量级范围内。起动摩阻风速达到 0.21 m/s 时,撞击颗粒的冲击作用才能产生足够的动能克服粉尘间的黏结力,粉尘才能释放;观测值约为 $0.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,可认为是局部弱粉尘释放现象。需要说明的是本次试验风速在春季 4 月均较低,导致模拟值和实测值无法进行绝对比较。DPM 粉尘释放模型中跃移通量方程中的 C 值取 2.61,然而在研究尼日尔的沙土时发现

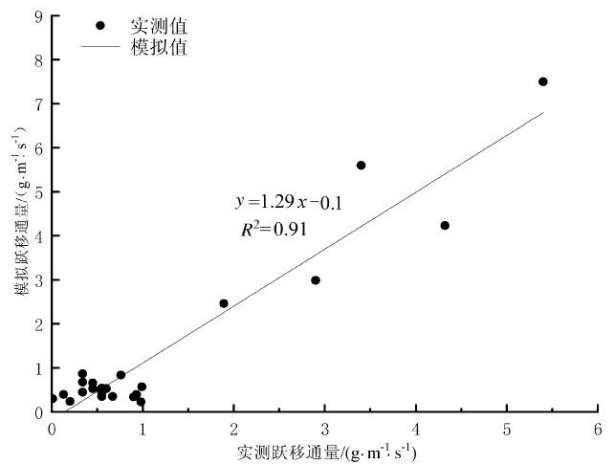


图 3 实测跃移通量与模拟跃移通量的相关性

C 值取 1 更合适,西班牙土壤 C 取值为 0.02 更合适^[35]。实验地点不同经验系数的取值也不同,由于研究手段和某些局限性,对经验系数 C 值的变化趋势和物理意义还有待继续探索。

根据粉尘释放原理,仅在土壤风蚀产生的跃移颗粒相互碰撞时,其具有的动能克服二者之间结合能,粉尘才能从表土微团粒中释放。简言之,粉尘释放通量主要关注的是跃移颗粒间的相互撞击和冲击作用。土壤风蚀区的粉尘释放通量伴随着风速的增大出现波动,这是由于影响粉尘释放通量的因素是多方面的,包括跃移通量,粉尘的粒度分布和颗粒间的相互结合能等。

2.3 含水率对粉尘释放通量的影响

表土土壤湿度是土壤风蚀起沙不可忽略的因素之一,由于沙尘颗粒在湿润的情况下可以增加其自身的粘滞性,颗粒间的团聚力也相应地增加,引起沙尘颗粒脱离地表的临界摩擦速度和起动风速及沙尘量。因而,土壤风蚀颗粒物样品表土中含水率的多少直接影响地表粉尘释放的起动摩阻风速。本文通过选取 3 种常用的经验模型模拟水分对粉尘释放的影响。

Bell 模型,沙粒粒径为 0.44 mm,利用风洞试验获得土壤含水率为 0.2%~4% 的模型,即:

$$U_{*c}^* = U_*^* [1.8 + 0.61g(100M)] \quad (5)$$

Hotta 模型,沙粒粒径为 0.2、0.5、0.8 mm,利用风洞试验获得土壤含水率 <0.8% 的模型,即:

$$U_{*c}^* = U_*^* + 7.5M \quad (6)$$

邵亚平模型^[32],通过风洞实验研究了 5 种粒径 (0.10~0.12、0.12~0.185、0.185~0.21、0.21~0.40 和 0.40~0.53 mm) 的澳大利亚风成红土,得出含有水分的颗粒起动摩阻风速公式,即实验前体积含水率在

0.3%~4.5%的模型。

$$U_{tc} = U_t^* \exp(22.7M \frac{\rho_b}{\rho_w}) \quad (7)$$

式中: ρ_b 为土壤容重; ρ_w 为水的密度, U_{tc}^* 为湿沙的起动摩阻风速; U_t^* 表示该沙在干燥条件下的起动摩阻风速; M 为含水率的函数。

距地表 5 cm 高度处土壤的物理特性对风蚀起沙的影响最大。沙尘天气下,5 cm 处的土壤体积含水率为零,视为特别干燥的地表土壤。约 10 cm 深处,尽管土壤体积含水率高达 23‰左右,但地表发生风蚀起沙现象的前后基本没有变化,持续保持在 23‰~24‰。由此可知,表土的含水率对风蚀起沙的影响甚微,忽略不计。

本文计算得到粉尘起动的摩阻风速为 0.21 m/s,将其带入 3 种模型,得到含有水分的颗粒起动摩阻风速,再将结果带入 DPM 模型进行计算。表土中水的密度假定为 $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,则认为体积含水量等于重量含水量。塔克拉玛干沙漠极度干燥,表土含水率可认为是 0(图 4)。Belly 模型的值较小,原因可能是放大了含水率对摩阻风速的影响,导致模拟的粉尘释放通量较小。Hotta 模型比较简单,不适用于野外复杂环境的模拟,邵亚平模型充分考虑了土壤容重和水的密度,可广泛适用于各种复杂的地表。

DPM 模型最初是应用于复杂的沙漠环境,采用的模型不同,不同下垫面的含水率不同,则导致土壤间的结合能亦不同,从图 4 粉尘释放通量变化曲线可看出,模型模拟值远远大于观测值。这是由于土壤间的含水率不仅影响粉尘起动摩阻风速,还影响土壤微团粒间的结合能。

3 讨论

粉尘释放研究是干旱区环境演变与治理领域研

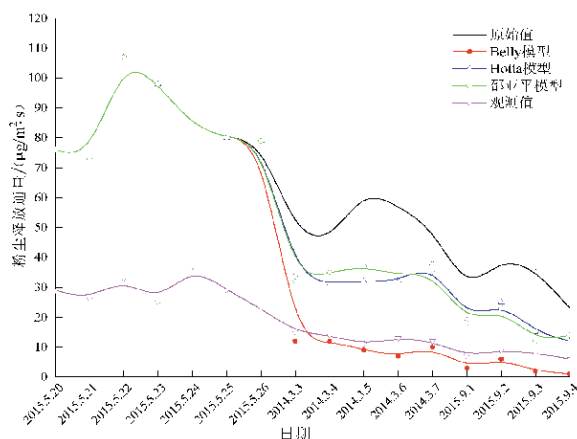


图 4 含水率对粉尘释放通量的模拟

究的热点,国内外科研工作者一直在开展试验观测与模型开发相关研究工作^[6,32-37],并取得了丰硕成果,为土壤风蚀产生的粉尘释放研究奠定了坚实的工作基础。因土壤风蚀机理的复杂性,本文的结论还存在一定的局限和不足。尽管土壤风蚀是粉尘释放的必要条件,但是土壤内部属性与粉尘释放之间的关系也存在一定的差异。土壤风蚀主要是风力侵蚀敏感度的直接反应,粉尘释放是从颗粒间动力学角度出发,强调其具备力学属性^[38]。纵观国内外研究,粉尘释放有众多模型,即使模型的理论框架和计算公式不同,但核心均是土壤风蚀的可蚀性计算模块^[38]。本文采用的 DPM 模型特定区域的土壤风蚀研究工作中均有成功的实例,但是相关核心参数还有待本地化。模型中相关计算参数的表达多为经验模型得出,其理论基础可能还存在缺陷^[39];模型的适用性具有明显的地带性特征,普适性也一直受到普遍质疑^[40]。由于人类活动影响,土壤风蚀在不同时空尺度中并非一成不变,而是具有动态变化特征^[41],本文采用的 DPM 模型及其他模型,常将其默认为一种静态属性^[42]。

今后应当探索一种具有普适性、科学性,同时能够体现土壤风蚀产生粉尘释放且具有力学属性的计算模型。

4 结论

利用塔克拉玛干沙漠腹地观测场的风速、温度数据,分别计算了典型土壤风蚀区 2、4、10 m 的空气动力学参数;采用 DPM 模型模拟计算了粉尘释放通量,得出以下结论:

(1)观测日内 2、4、10 m 高度处的风速最大值出现在 12 时,约为 7.5 m/s,4 月 20 日的风速较其他观测日大。随着观测高度层的增加,风速廓线变化较为复杂,2、4 m 高度层风速廓线在观测日内下旬风速变化大于上旬风速变化。DPM 模型模拟的粉尘释放通量值与平均摩阻风速呈线性关系,二者相关系数仅为 0.51。本研究中,DPM 粉尘释放模型中跃移通量方程中的 C 值取 2.61。

(2)DPM 模型在野外试验中取得了较好的模拟效果。起动摩阻风速达到 0.21 m/s 时,撞击颗粒的冲击作用才能产生足够的动能克服粉尘间的黏结力,进而发生粉尘释放;当观测值约为 0.34 m/s 时,可认为是局部地区的弱粉尘释放事件。

(3)模型模拟值小于观测值是由于在计算跃移通量时,忽略了风蚀起沙过程中沙粒起跳后的相互

碰撞过程中能量的损失,进一步影响对跃移通量的贡献。总体而言,DPM 粉尘释放模型在预测跃移通量和实测值之间有较好的一致性。

参考文献:

- [1] 王仁德,邹学勇,赵婧妍,等.北京市平原区农田土壤蚀积特征分析[J].水土保持学报,2011,25(1):20-24.
- [2] 李洪文,高焕文,王小燕,等.农田风蚀对我国北方沙尘暴的影响[C]//中-加保护性耕作论坛.北京,2006.
- [3] WCB B N P, MCGOWAN H A, Phinn S R, et al. AUSLEM (Australian Land Erodibility Model): a tool for identifying wind erosion hazard in Australia [J]. Geomorphology, 2006, 78(3/4): 179-200.
- [4] 王晓峰, 勒斯木初, 张明明. “两屏三带”生态系统格局变化及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2019, 38(7): 2138-2148.
- [5] 王晓峰, 张明明, 尹礼唱, 等. 2000—2015 年中国干旱半干旱地区沙漠化进程驱动力研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5): 948-957.
- [6] 杨兴华, 康永德, 周成龙, 等. 塔克拉玛干沙漠土壤粒度分布特征及其对粉尘释放的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 167-174.
- [7] 康永德, 夏开伟, 杨兴华, 等. 近地层沙尘水平通量与集沙效率野外观测分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 168-174.
- [8] BAGNOLD R A. The physics of blown sand and desert dunes[M]. London: Methuen, 1941.
- [9] WOODRUF N P, SIDDOWAY F H. A wind erosion equation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1965, 29(5): 602-608.
- [10] PASAK V. Wind erosion on soil[J]. VUM Zbraslav, Scientific Monographs, 1973, 930: 78-89.
- [11] BOCHAROV A P. A description of devices used in the study of wind erosion of soils [M]. New Delhi: Oxonium Pres, 1984.
- [12] GREGORY J M, BORCLI J, FEDLER C B. Team: Texas erosion analysis model [C]//Proceedings of 1988 Wind Erosion Conference. Lubbock. Texas. Texas Technology University, 1988: 88-103.
- [13] HAGEN L J. Wind erosion prediction system (WEPS) wind erosion research unit[R]. Technical Documentation, 1996.
- [14] FRYRCAR D W, CHEN W N, LESTER C. Revised wind erosion equation [J]. Annals of Arid Zone, 201, 40(3): 265-279.
- [15] 吴晓光, 姚云峰, 迟文峰, 等. 1990—2015 年内蒙古高原土壤风蚀时空差异特征[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(3): 117-127.
- [16] 申陆, 田美荣, 高吉喜. 基于 RWEQ 模型的浑善达克沙漠化防治生态功能区土壤风蚀与主要影响因子分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 90-97.
- [17] 于宝勒, 吴文俊, 赵学军, 等. 内蒙古京津风沙源治理工程土壤风蚀控制效益研究[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1278-1286.
- [18] 王旭洋, 郭中领, 常春平, 等. 中国北方农牧交错带土壤风蚀时空分布[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 12-22.
- [19] 刘初全. 黄绵土类农田地表粉尘释放通量观测及 DPM 模型野外验证[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- [20] 王颖钊. 西北半干旱区城郊农田地表粉尘释放模型的初步研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- [21] 栗志艳. 壤土类农田地表粉尘释放及 DPM 模型的适用性验证[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [22] 高广磊, 殷小琳, 丁国栋, 等. 土壤风蚀可蚀性研究进展评述[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2022, 20(1): 143-150.
- [23] 张扬, 田美荣, 陈艳梅, 等. 基于 RWEQ 模型的磴口县沙地与耕地风蚀评价及验证[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(9): 95-102.
- [24] WEBB N P, STRONG C L. Soil erodibility dynamics and its representation for wind erosion and dust emission models [J]. Aeolian Research, 2011, 3(2): 165-168.
- [25] 谢祖欣, 王宏, 郑秋萍, 等. 2015 年福州市大气颗粒物污染特征[J]. 环境科学研究, 2017, 30(6): 864-873.
- [26] 荣双, 王萍. 风向对街谷内颗粒物扩散的 DPM 数值模拟研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(2): 38-42.
- [27] 谢海英, 陈康民. 风向对街道峡谷内污染物扩散的影响[J]. 环境科学研究, 2011, 24(5): 497-504.
- [28] 康永德, 杨兴华. 荒漠过渡带不同下垫面的粒度特征分析[J]. 河西学院学报, 2017, 33(5): 46-51.
- [29] LIU Xinchun, KANG Yongde, CHEN Hongna, et al. Hydrothermal effects of freeze-thaw in the Taklimakan Desert[J]. Sustainability, 2021, 13: 1292-1298.
- [30] 郑先念, 康永德, 杨兴华, 等. 塔克拉玛干沙漠沙尘天气频数统计研究[J]. 环境科学与管理, 2021, 46(10): 133-137.
- [31] 康永德, 杨兴华, 霍文, 等. 沙尘天气下输沙率的野外观测与分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(1): 63-69.
- [32] 梅凡民, 张小曳. 中国北方粉尘释放通量的模拟与观测—以巴丹吉林沙漠戈壁、阴山北部干草原农垦区和草原牧区为例[J]. 科学通报, 2004, 17(2): 15-17.
- [33] 梅凡民, RAJOT J, ALFARO S, 等. 毛乌素沙地的粉尘释放通量观测及 DPM 模型的野外验证[J]. 科学通报, 2006, 51(11): 1326-1332.
- [34] 车慧正, 张小曳, 李扬, 等. DPM 模型计算中国北方沙漠地区粉尘释放通量[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(5): 49-55.
- [35] SHAO Y P, KOHFELD K E. Aeolian processes[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33: 1805-1810.
- [36] 翟子宁, 苏备. 土壤可蚀性研究进展[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 253-260.

- [37] 南岭,杜灵通,展秀丽.土壤风蚀可蚀性研究进展[J].土壤,2014,46(2):204–205.
- [38] 郑子成,张锡洲,李廷轩,等.玉米生长期土壤抗蚀性特征及其影响因素分析[J].农业工程学报,2014,30(4):100–105.
- [39] PANEBIANCO J E, BUSCHIAZZO D E, ZOBECK T M. Comparison of different mass transport calculation methods for wind erosion quantification purposes [J].Earth Surface Processes and Landforms,2010,35 (13):1548–1554.
- [40] ZOU Xueyong,ZHANG Chunlai,CHENG Hong,et al. Cogitation on developing a dynamic model of soil wind erosion[J]. Science China:Earth Science,2015,58:462–472.
- [41] LI Pengfei,MU Xingmin,HOLDEN J, et al. Comparison of soil erosion models used to study the Chinese Loess Plateau[J]. Earth–Science Reviews, 2017,170:17–25.
- [42] 巩国丽,刘纪远,邵全琴.基于 RWEQ 的 20 世纪 90 年代以来内蒙古锡林郭勒盟土壤风蚀研究[J].地理科学进展,2014,33(6):825–834.

Dust Emission Flux in Taklimakan Desert

ZHANG Chenliang¹,TAO Tao²,ZHOU Chenglong³,JIANG Jujin⁴

(1. Xinjiang Meteorological Technology and Equipment Support Center, Urumqi 830002, China;

2. Xinjiang Meteorological Information Center, Urumqi 830002, China;

3. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China;

4. Weather Modification Office of Korla in Bayingol Mongolian Autonomous Prefecture, Korla 841000, China)

Abstract Dust particles generated by soil wind erosion have seriously affected the air environment quality. To explore the dust emission law, it is necessary to study the mutual mechanism of wind speed and friction wind speed at different heights on dust emission flux. In the case of only observed data, it was necessary to study the dust release caused by soil wind erosion by simulation. In this paper, the variation of wind speed at different altitudes in Taklimakan Desert and the average friction wind speed were analyzed, and the dust release flux was calculated by DPM model. The relationship between the average friction wind speed and the dust release flux was comprehensively analyzed. The results showed that: (1)The variation of wind speed at different altitudes was different in different observation days. The variation range of wind speed at 2 m height was 0.05–7.73 m·s⁻¹, the variation range of wind speed at 4 m height was 0.09–7.19 m·s⁻¹, and the variation range of wind speed at 10 m height was 0.5–8.09 m·s⁻¹.(2)From April 1st to April 30th, the average friction wind speed within 24 hours of each observation day was 0.42, 0.34, 0.27, 0.34, 0.16 and 0.32 m·s⁻¹, respectively, and its variation range was 0.16–0.42 m·s⁻¹;(3)The measured jump flux was about 129% of the simulated value, and the correlation between the simulated value and the measured value was good, with the quadratic coefficient of 0.91.

Key words DPM model; soil wind erosion; Taklimakan Desert; friction velocity