

平坦沙质地表蚀积量计算模型研究

安志山, 张克存, 屈建军, 谭立海, 张号

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 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, 甘肃省风沙灾害防治工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 通过对平坦沙质地表蚀积动态的野外观测, 结合同时期区域风况资料, 分析了平坦沙质地表蚀积过程。在输沙势和最大可能输沙量计算公式基础上, 调整参数提出了平坦沙质地表蚀积量的计算模型, 弥补了两者不能直观准确表示区域风沙活动的缺点。通过对比野外实测值与输沙势、模型预测值和最大可能输沙量之间的变化趋势得出它们存在同期波动特征。进一步比较回归方程可知, 模型预测值回归方程更加显著, 预测值更加接近实测值, 能够更好地表示区域风沙活动特征和强度, 可为沙漠的扩张和收缩提供量化预测依据。

关键词: 输沙势; 最大可能输沙量; 平坦沙质地表; 风蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)05-0210-05

中图分类号: TV142.1

Computational Model of Aeolian Sand Erosion and Deposition Quantity on Flat Sandy Surface

AN Zhi-shan, ZHANG Ke-cun, QU Jian-jun, TAN Li-hai, ZHANG Hao

(Dunhuang Gobi Research Station/Key Laboratory of Desert and Desertification, Institute of Environmental and Engineering in Cold and Arid Regions, Chinese Academy of Sciences, and Gansu Center for Sand Hazard Reduction Engineering and Technology, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The dynamic processes of aeolian erosion and deposition on flat sandy surface were analyzed based on field observation and the data of regional wind regime. By calculating the drift potential and the maximum possible quantity of sand transport, a computational model was put forward for predicting the quantity of aeolian erosion and deposition on flat sandy surface, which can make up for the deficiency that both the drift potential and the maximum possible quantity of sand transport can not reveal intuitively the strength of regional wind-blown sand activity. Comparison of tendency maps showed that field measured value, predicted value by the computational model and calculated drift potential and maximum possible quantity had the same fluctuation character. Furthermore, comparison of regression equations showed that the regression equation for prediction was significant and predicted value was more close to field measured value. The computational model can better predict the strength of regional wind-blown sand activity and provides evidence for the expansion and shrink of sandy desert.

Keywords: drift potential; maximum possible sand transport quantity; flat sandy surface; aeolian erosion

风是塑造地貌形态的基本营力之一,也是沙粒发生运动的动力基础。半个多世纪以来,许多学者对气流和风沙活动进行了研究,提出各种各样的表示方法,如输沙势、最大可能输沙量和输沙率公式等。输沙势是衡量区域风沙活动强度及风沙地貌演变的重要指标,也是目前风沙活动强度计算、应用最为广泛的方法,表示潜在的输沙能力^[1-2]。输沙率是指单位时间通过单位床面宽度的沙粒质量,国内学者^[3-6]在前人研究基础上,通过实验修正了 Bagnold 输沙率公

式,提出最大可能输沙量概念,表示输沙率的理论极限值,并给出计算公式,但两者皆无法验证且无法直观表示区域风沙活动强度。蚀积量和蚀积强度是阐明风成地貌发育以及防治风沙灾害的基础,可以直观地表示区域风沙活动强度,但目前风沙蚀积量的计算较多采用输沙率间接计算,误差较大^[7-10]。为此,本文通过野外观测,参考输沙势和最大可能输沙量公式,得出平坦沙质地表蚀积量的计算模型,希望能够为沙漠的扩张与收缩提供量化预测依据。

收稿日期:2012-11-15

修回日期:2013-01-05

资助项目:国家自然科学基金项目“沙山湖泊局地环流特征研究”(41071009);中国科学院“西部之光”项目“鸣沙山移动规律及其对月牙泉影响研究”(29Y128841)

作者简介:安志山(1986—),男(汉族),河南省安阳市人,助理工程师,主要从事风沙工程研究与仪器研发。E-mail:an1986wen@163.com。

1 观测区与试验设计

腾格里沙漠位于阿拉善高原东南部,地理坐标为 37°54′—39°33′N,103°52′—105°36′E,沙漠面积 3.67 × 10⁴ km²,是中国第 4 大沙漠。以流动沙丘为主,兼有一定比例的固定、半固定沙丘,沙漠内部湖泊较多,多数已经干涸并演化为盐湖。风向以 NW 和 EN 为主,沙丘类型以格状沙丘面积最大,由 NE—SW 走向的主梁和与之垂直的 SE—NW 的副梁为主,其次为新月形沙丘。沙丘高度变化幅度较小,以 3~20 m 为主,沙丘间距较小,为 30~170 m^[11-13]。

试验在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所吊梁野外观测场完成。观测场建立在腾格里沙漠东南缘,中卫市的西北角(37°32′N,105°02′E),观测场内经推土机平整,观测场规格为 500 m×400 m,观测场中心安装一座观测塔,塔高 50 m,风速风向传感器安装在距地面 12 m 高度处,传感器数据采集间隔为 1 min。本文参考前人的实验结果,定义沙粒启动的风速为 5.9 m/s。

平坦沙质地表试验区位于观测塔旁侧,面积规格为 10 m×10 m,蚀积量测定采用测钎法,以正东和正北为正方向设置观测点,每隔 1 m 设置 1 根测钎,供布设 121 根测钎。每根测钎高度为 80 cm,初露高度统一为 40 cm。

2 蚀积量计算方法

先对 121 根测钎的出露高度按照以下公式进行处理:

$$h = h_1 - h_0 \quad (1)$$

式中: h ——测量周期内蚀积深度(cm); h_1 ——沙下测钎深度(cm); h_0 ——沙下测钎初始深度(cm)。

运用 Table Curve 2D v 5.01 软件,采用最小二乘法对 h 进行函数拟合 $f(x)$,用决定系数 ($R^2 > 0.98$) 控制,用 MATLAB 对 $f(x)$ 进行积分,求出风沙蚀积量 $Q(\text{cm}^3/\text{m}^2)$ 。当 $Q > 0$ 时,表示风沙堆积; $Q < 0$,表示风蚀; $Q = 0$,表示蚀积平衡^[7]。

3 风沙活动特征

从图 1 可知,观测期间内,起沙风以 E 和 NW 风为主,与前人^[14-15]观测结果一致,分别占起沙风频率的 21%和 22.7%,合成起沙方向为 10.6°,合成输沙方向为 190.6°。其次起沙风频率较大者为 NNW, ESE, WNW 和 ENE,频率分别为 10.4%, 7.7%, 7.3%和 6.8%。其余风向频率则较小,起沙风频率之和仅为 24.1%。进一步比较偏东方向(ESE, E,

ESE)和偏西北方向可知,偏西北方向频率较偏东方向大 4.9%。

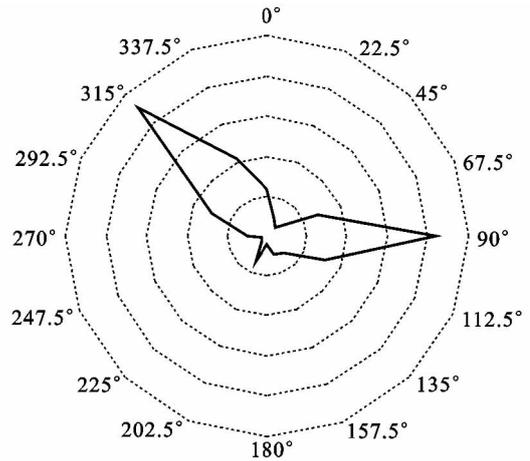


图 1 研究区起沙风分布情况

通过对测量期内风速资料的统计可知,风速大于 5.9 m/s 的起沙风频数占总频数的 11.69%。在大于 5.9 m/s 起沙风速中,以 5.9~6.9 m/s 的风速为主,占全部起沙风频数的 58.12%;其次为 7.0~7.9 m/s 的风速,占 24.94%; 8.0~8.9 m/s 的风速占 12.35%;三者之和占 95.4%,而大于 9.0 m/s 的风速仅占 4.6%。可见,风速越高,频率越低,且观测期间起沙风以 5.9~9.0 m/s 风速为主。进一步分析不同时段起沙风频率分布图(图 2)可知,起沙风频率在各个统计时期内差别较大,其中 7 月 30 日至 8 月 30 日内最大,占总起沙风频数的 36.68%,风沙活动强度较大,其次为 6 月 4 日至 7 月 6 日,占总起沙风频数的 31.86%,风沙活动强度其次,最小为 10 月 30 日至 11 月 15 日,占 1.09%,其余观测期间起沙风频率差别较小,即风沙活动强度相差较小。

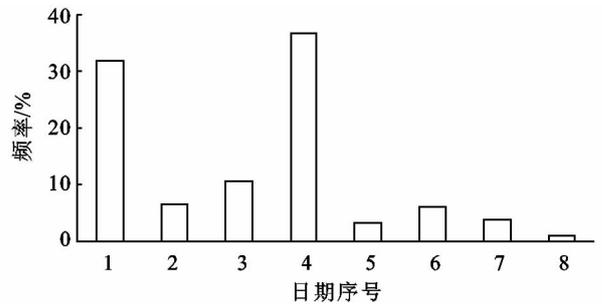


图 2 研究区不同时间段起沙风频率分布

注:日期序号中 1 指 6 月 4 日至 7 月 6 日; 2 指 7 月 7 日至 7 月 15 日; 3 指 7 月 16 日至 7 月 29 日; 4 指 7 月 30 日至 8 月 30 日; 5 指 8 月 31 日至 9 月 30 日; 6 指 10 月 1 日至 10 月 15 日; 7 指 10 月 16 日至 10 月 30 日; 8 指 10 月 31 日至 11 月 15 日。

在观测期内,观测场平均速度为 3.10 m/s,小于起沙风风速平均值(6.60 m/s)。且各统计期间内平均风速均小于起沙风,其中以 7 月 30 日至 8 月 30 日

平均风速最大,为 4.48 m/s;10 月 31 日至 11 月 15 日平均风速最小,为 1.59 m/s。平均起沙风速最大时期为 8 月 31 日至 9 月 31 日,为 7.06 m/s;平均起沙风风速最小时期是 10 月 31 日至 11 月 15 日,平均起沙风为 6.05 m/s。

4 蚀积过程

在平坦沙质地表观测初期,沙地整体变化趋势较为缓慢,监测区内测点高度变化较小,在沙地西部和西北部,出现轻微的剥蚀现象,而沙地局部出现堆积现象,形成小块沙包。由图 3 可见,7 月 7 日至 7 月 15 日,沙包分别向东北和西南方向移动,中间出现 NW—ES 走向的轻微风蚀凹槽。7 月 16 日至 7 月

29 日,风蚀凹槽进一步发育,凹槽底部风蚀程度进一步加剧,两侧堆积高度增加。7 月 30 日至 8 月 30 日,风蚀凹槽逐渐发育成熟,凹槽底部风蚀程度和两侧堆积高度变化较小,而凹槽 NW—ES 走向明显,但凹槽风蚀程度由西北向东南方向逐渐减弱。8 月 31 日至 9 月 15 日,风蚀凹槽发育成熟,风蚀等值线无明显波动,堆积和风蚀相对稳定,试验区域地势无明显变化。9 月 16 日至 9 月 30 日,在风蚀凹槽中心产生一个小型风蚀坑,风蚀凹槽再次产生变化。10 月 1 日至 10 月 15 日,在原小型风蚀坑的位置处出现堆积现象,形成一块相对凹槽前后地势较高的平地。10 月 16 日至 11 月 15 日,在西北风向影响下,堆积平地继续发育,平地面积增大,高度增加,且向东南风向移动。

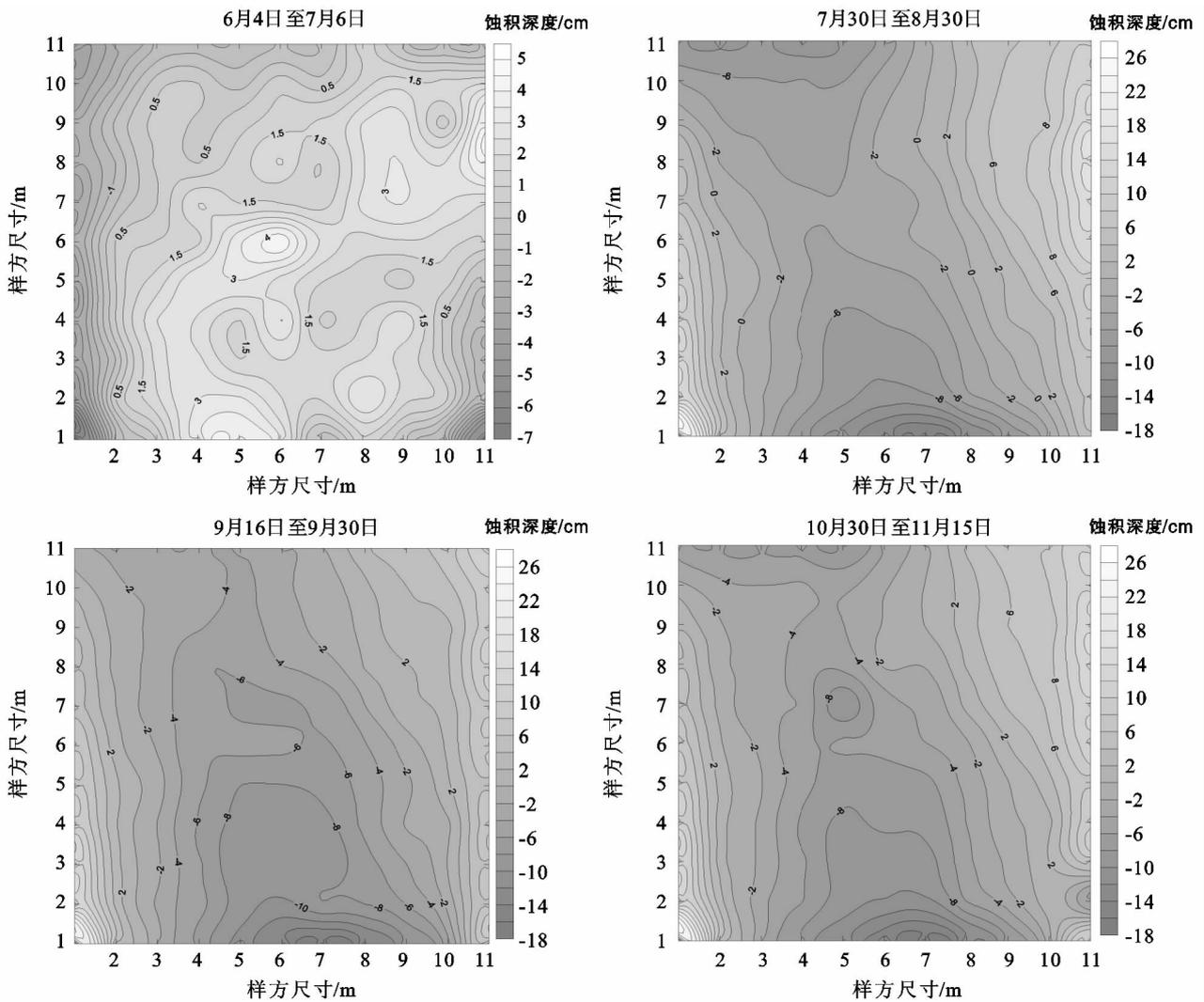


图 3 平坦沙质地表蚀积动态变化

5 模型计算

5.1 基础模型

假设研究区域的风沙环境为完全的开放系统,并与周边环境存在风沙物质交换,则研究区域的蚀积状

况取决于该研究区域内沙物质的输入和输出。假定研究区域在某一段时间内风沙物质的输入量为 M_0 , 输出量为 M_e , 则该区域沙物质蚀积状况可以表示为:

$$W_e = M_0 - M_e \tag{2}$$

式中: W_e ——特定时段内风沙蚀积量 (cm^3); M_0 ——

特定时段内风沙物质输入量(cm^3); M_e ——特定时段内风沙物质输出量(cm^3)。

当 $W_e > 0$, 物质输入量大于输出量, 为风积区; 当 $W_e < 0$, 物质输入量小于输出量, 为风蚀区; 当 $W_e = 0$, 物质输入量等于输出量, 为风沙蚀积平衡区^[7]。

5.2 模型推导与计算

数学模型参考 Fryberger 输沙势公式和凌裕泉的最大可能输沙量的计算公式^[17]。

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= a(v_1 - v_t)^b \times f_{11} \times t + a(v_2 - v_t)^b \times f_{12} \times t + a(v_3 - v_t)^b \times f_{13} \times t + \dots + a(v_n - v_t)^b \times f_{1n} \times t - c_1 \\
 Q_2 &= a(v_1 - v_t)^b \times f_{21} \times t + a(v_2 - v_t)^b \times f_{22} \times t + a(v_3 - v_t)^b \times f_{23} \times t + \dots + a(v_n - v_t)^b \times f_{2n} \times t - c_2 \\
 Q_3 &= a(v_1 - v_t)^b \times f_{31} \times t + a(v_2 - v_t)^b \times f_{32} \times t + a(v_3 - v_t)^b \times f_{33} \times t + \dots + a(v_n - v_t)^b \times f_{3n} \times t - c_3 \\
 &\vdots \\
 Q_{n-1} &= a(v_1 - v_t)^b \times f_{(n-1)1} \times t + a(v_2 - v_t)^b \times f_{(n-1)2} \times t + a(v_3 - v_t)^b \times f_{(n-1)3} \times t + \dots + a(v_n - v_t)^b \times f_{(n-1)n} \times t - c_{n-1} \\
 Q_n &= a(v_1 - v_t)^b \times f_{n1} \times t + a(v_2 - v_t)^b \times f_{n2} \times t + a(v_3 - v_t)^b \times f_{n3} \times t + \dots + a(v_n - v_t)^b \times f_{nn} \times t - c_n
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

令: $Q = Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2 + \dots + Q_{n-1}^2 + Q_n^2$, 其中, c_n 为对应时段内的实测蚀积量, 并对 Q 分别取 a 和 b 的偏导数, 解方程组(7):

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial Q}{\partial b} = 0 \tag{5}$$

求得 Q 极值时 a 和 b 的值, 进而确定最优值。由以上解法可得:

$$Q = \sum 0.03 \times (v - v_t)^{3.29} \times f \times t \tag{6}$$

5.3 模型验证

5.3.1 蚀积量与输沙势比较 输沙势是衡量区域风沙活动的重要标志, 应用较广^[14-15, 17-19], 而蚀积量是表明区域内风沙物质在时段内的输入与输出^[7]。从三者趋势图(图 4a)中可以看出, 野外实测值、模型预测值和输沙势三者之间变化趋势存在同期波动特征, 但三者波动幅度不同。三者同时在 8 月 30 日到达峰

假设:

$$Q = \sum a(v - v_t)^b \times f \times t \tag{3}$$

式中: Q ——蚀积量, 特定时间段内单位面积蚀积量(cm^3/m^2); v ——大于临界启动值的风速(m/s); v_t ——临界启动风速, 这里取 5.9 m/s , 高度 12 m ; f ——对应时间段内大于临界启动风速的频数; t ——测量时间间隔(min); a, b ——待定常数。使用最小二乘法进行计算, 计算过程如下:

值, 分别为: $17057.8, 18471.2 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ 和 184.20 VU ; 在 11 月 15 日取得最小值 $429.75, 1011.5 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ 和 1.76 VU 。其中, 在 10 月 16 日至 10 月 30 日, 由于接近临界启动风速的频数较多, 野外实测值在 10 月 30 日出现较大波动, 而依据气象数据进行计算的模型预测值和输沙势波动较小, 与野外实测值存在一定差距。图 4b 进一步说明相同时段内平坦沙质地表野外实测值、模型预测值和输沙势三者之间的关系, 三者存在明显的线性关系。比较输沙势、模型预测值与野外实测值的回归方程(图 4b, 其中 x 表示实测蚀积量, y_1 和 y_2 分别表示预测值和输沙势), 可知模型预测值回归方程决定系数较大, 拟合度更高。由此可以判定, 模型预测值能够更好地表示平坦沙质地表蚀积量, 其值更加贴近野外实测值。

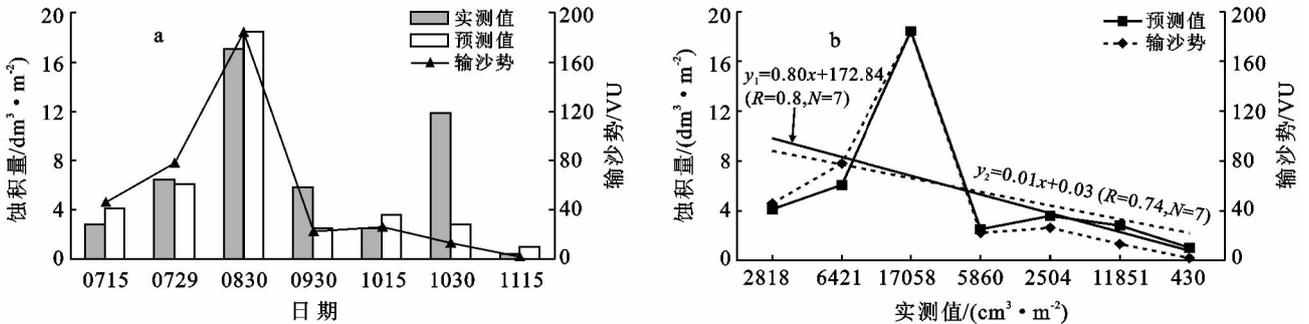


图 4 蚀积量实测值、预测值和输沙势趋势与回归分析

5.3.2 蚀积量与最大可能输沙量比较 最大可能输沙量是指当沙源充足, 沙面平坦裸露时, 气流充分作用于流沙表面所具有对沙物质的最大可能搬运能力, 指输沙量的理论极限值。其计算公式为:

$$Q = \sum 0.895 \times (v - v_t)^{1.9} \times f \times t \tag{7}$$

式中: Q ——最大可能输沙量(m^3/m); f ——对应时间段内大于临界启动风速的频数; t ——测量时间间隔(min)^[6]。

由最大可能输沙量趋势图(图 5)可知: 最大可能输沙量、模型预测值和野外实测值之间关系特征与输沙

势相同,即存在同期波动特征,三者同时在 8 月 30 日达到峰值,分别为 $1\ 690.9\ \text{m}^3/\text{m}$, $18\ 471.2$ 和 $17\ 057.8\ \text{cm}^3/\text{m}$,但最大可能输沙量与模型预测值之间的波动趋势更相近,主要原因是两者均依据气象数

据进行计算。进一步分析三者回归方程可知,模型预测值与野外实测值之间的回归方程决定系数较最大可能输沙量回归方程大,可见相比最大可能输沙量,模型预测值能够更加准确地表示平坦沙质地表蚀积量。

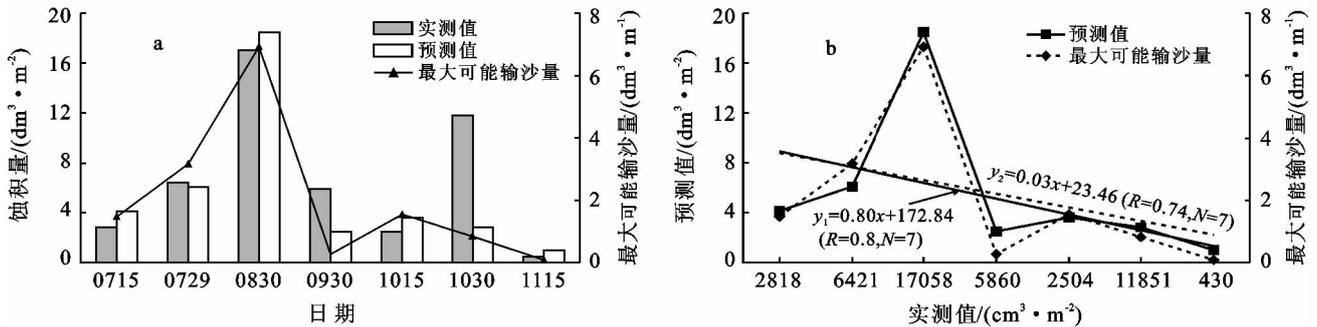


图 5 蚀积量实测值、预测值和最大可能输沙量趋势与回归分析

6 结论

通过野外布设试验进行观测,并在输沙势和最大可能输沙量计算公式的基础上修改参数,提出了平坦沙质地表蚀积量的计算模型,弥补两者无法直观预测风沙活动的不足,同时也避免依据输沙率进行预测蚀积量而产生的较大误差。通过比较输沙势、最大可能输沙量、模型预测值和野外实测蚀积强度之间趋势图和回归方程,得出模型预测值回归方程更显著,能够更准确表示平坦沙质地表蚀积量,更贴近野外实测值,更直观表示区域风沙活动状况。研究结果可为沙漠扩张和收缩提供理论依据。

[参 考 文 献]

- [1] Fryberger S G, Dean G. Dune forms and wind regime[C]//McKee E D. A Study of Global Sand Seas. US Geological Survey Professional Paper, 1979,1052:137-169.
- [2] Lettau K, Lettau H. Experimental and micrometeorological field studies of dune migration [C]//Lettau K, Lettau H. Exploring the World's Driest Climate. University of Wisconsin-Madison, IES Report, 1978,101:110-147.
- [3] 李振山,倪晋仁. 挟沙气流输沙率研究[J]. 泥沙研究, 2001(1):1-10.
- [4] Dong Zhibao, Liu Xiaoping, Wang Hongtao. Aeolian sand transport: A wind tunnel model[J]. Sedimentary Geology, 2003,161(1):71-83.
- [5] 凌裕泉. 输沙量水平分布的非均匀性[J]. 实验力学: 1994,9(4):352-356
- [6] 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.
- [7] 刘连友. 区域蚀积量和蚀积强度初步研究:以晋陕蒙接壤区为例[J]. 地理学报,1999,54(1):59-68.
- [8] Hu Xiao, Liu Lianyou, Li Shunjiang. Estimation of sand transportation rate for fixed and semi-fixed dunes using meteorological wind data[J]. Pedosphere, 2009, 19(1):129-136.
- [9] Liu Lianyou, Skidmore E, Hasi E. Dune sand transport as influenced by wind directions, speed and frequencies in the Ordos Plateau[J]. Geomorphology, 2005,67(3):283-297.
- [10] Han Zhiwen, Dong Zhibao, Wang Tao. Observations of several characteristics of aeolian sand movement in the Taklimakan Desert[J]. Science in China(D): Earth Sciences, 2004,47(1):86-96.
- [11] 闫满存,董光荣,李华梅,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.
- [12] 凌裕泉,金炯,甄计国. 腾格里沙漠东南缘的风沙活动规律[M]//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,1988:309-316.
- [13] 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,1999(29):466-471.
- [14] 张正德,董治宝,赵爱国,等. 沙漠地区风沙活动特征[J]. 干旱区研究,2007,24(4):550-555.
- [15] 张克存,屈建军,昝瑞平,等. 腾格里沙漠东南缘输沙势与最大可能输沙量之比较[J]. 干旱区地理,2008,31(5):643-648.
- [16] 黄富祥,牛海山,王明星,等. 毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系[J]. 地理学报,2001,56(6):700-710.
- [17] 李红军,何清,杨青. 近 40 年新疆输沙势的分析[J]. 中国沙漠,2004,24(6):706-710.
- [18] Fryrear D W. Wind erosion: field measurement and analysis[J]. Transactions of the ASAE, 1991,34(1):155-160.
- [19] Bagnold R A. 风沙和荒漠沙丘物理学:中译本[M]. 北京:科学出版社,1959:168-171.