

# 塔克拉玛干沙漠风沙活动强度特征

昝瑞平, 张克存, 屈建军

(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, 兰州 730000)

**摘要:** 通过风资料的统计和计算, 对塔克拉玛干沙漠风沙活动强度特征进行了系统研究。结果表明, 塔克拉玛干沙漠年平均风速较小, 在沙漠内部年平均风速与温度变化呈现“风热同步”现象; 有效起沙风作用时间存在明显区域差异, 随着风速等级的增加, 其出现的频率相应减少, 基本上都集中在  $6.1 \sim 10.0 \text{ m/s}$  之间; 输沙势和最大可能输沙量, 除若羌地区外, 整个沙漠属于低风能环境, 且存在很大区域差异, 对输沙贡献最大的风速以  $9.0 \sim 11.0 \text{ m/s}$  为主。

**关键词:** 平均风速; 起沙风速; 输沙强度; 塔克拉玛干沙漠

**文章编号:** 1000-0585 (2005) 05-0699-09

风是塑造地貌形态的基本营力之一<sup>[1]</sup>, 特别是在干旱气候条件下, 它是决定沙漠地表形态的主要动力<sup>[2]</sup>, 也是造成风沙危害的直接动力条件<sup>[3,4]</sup>。因此, 研究风沙活动强度不仅是深刻揭示沙丘形成演变的前提条件, 也是为区域沙害防治服务的理论依据。

塔克拉玛干沙漠是我国最大的沙漠 (图 1), 面积  $35 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 其中沙丘类型齐全、结构复杂; 加之沙漠内部和周边分布着众多古城遗址, 吸引着国内外科研、考古及探险者的关注。其中, 风沙强度及其危害历来受到我国学者重视。早在 20 世纪 60 年代, 朱震达等就对沙漠边缘的风沙问题做过研究<sup>[5,6]</sup>。80 年代《塔克拉玛干风沙地貌研究》一书的出版使塔克拉玛干沙漠风沙研究进入了一个崭新阶段<sup>[7]</sup>。随后, 沙漠油田开发和沙漠公路的贯通, 为整个沙漠特别是沙漠腹地的研究提供了机遇。凌裕泉等率先研究了近地表流场特征与输沙强度的关系, 并对该区域沙漠化问题作了探讨<sup>[8]</sup>; 董治宝等着重研究了沙漠公路沿线风沙活动特征<sup>[9]</sup>; 王训明等则对沙漠腹地和沙漠东北部的风况特征与沙丘形态动力学过程进行了研究<sup>[10,11]</sup>; 陈渭南<sup>[12]</sup>、李振山<sup>[13]</sup>、陈广庭等<sup>[14]</sup>分别研究了沙漠公路沿线及整个盆地的起沙风况。

上述研究均取得了重要成果, 然而由于塔克拉玛干沙漠自然环境恶劣、交通不便、资料缺乏等条件制约, 这些成果多针对点或者线, 而对整个面上的风沙活动研究相对较少。本文利用覆盖整个沙漠的近 20 个气象站的自计风速风向资料, 对塔克拉玛干沙漠风沙活动强度进行了系统研究, 以便为区域风沙地貌研究和沙害防治实践提供理论依据。

## 1 资料来源与研究方法

风速风向资料来源于沙漠内部和边缘地带的 20 个气象站 (图 1) 的 16 方位自动风速仪记录, 风速仪风杯距地面高度均为  $11.4 \text{ m}$ , 记录的时间步长为 10 分钟 (即风速、风向

收稿日期: 2004-10-12; 修订日期: 2005-03-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G2000048705)、所创新项目 (2004105; 2003110) 资助

作者简介: 昝瑞平 (1973-), 山西岚县人, 副研究员。风沙地貌与风沙工程专业。

均为每小时 6 次纪录)。由于沙漠周边各站资料记录年限较长,而沙漠公路沿线的肖塘、满参及塔中三站均从 1994 年开始,在年平均风速统计中沙漠周边站点采用资料年限为 1965~2000 年,沙漠公路沿线三站为 1996~2000 年(满参站只有 1995~1996 年资料)。为同步起见,在起沙风、输沙势及输沙量统计和计算中,所有站点一律采用 1996~2000 年风资料(满参站只有 1 年)。由于对风沙地貌及沙害形成具有直接作用的是大于临界起沙风风速,在资料统计以前首先要确定临界起沙风速。根据前人研究结果<sup>[12,13]</sup>,在塔克拉玛干沙漠距地面 11.4m 处,临界起沙风速一般取 6.0m/s。从每个气象站同期记录中统计大于临界起沙风速(6.0m/s)的出现次数,就可以得到 16 方位每年大于起沙风次数(时间)。

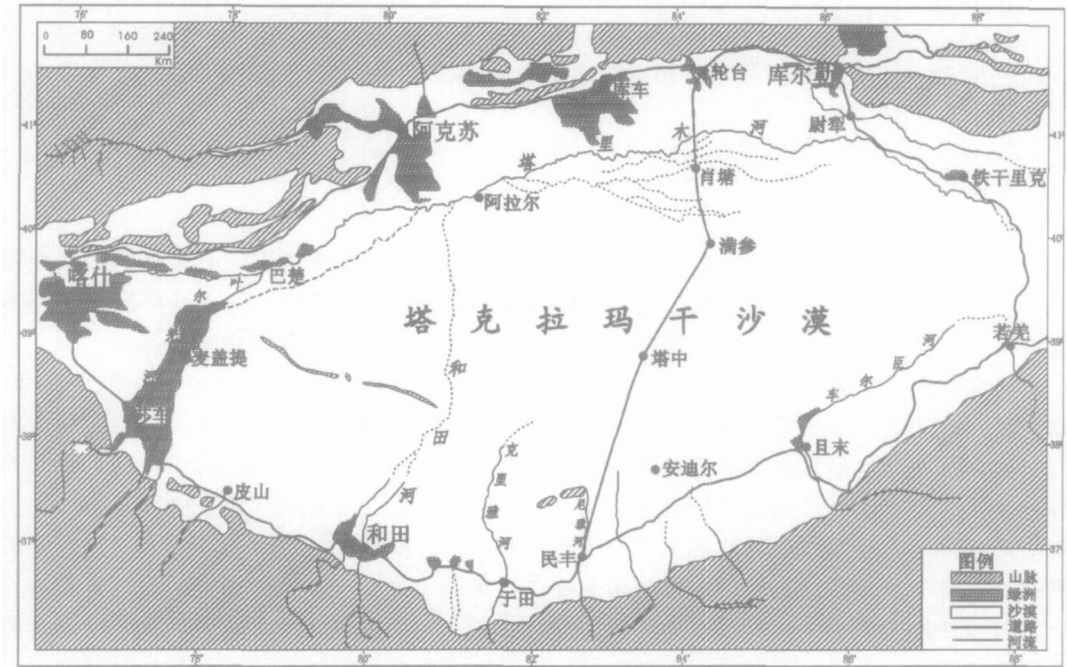


图 1 塔克拉玛干沙漠位置及其中分布的气象站

Fig 1 Location of Taklimakan Desert and distribution of the meteorological stations in Taklimakan Desert

2 平均风速

平均风速是衡量风沙强度活动的指标之一,一般有年平均、月平均与日平均之分。由于不同区域、不同时间盛行风向强度的差异,塔克拉玛干沙漠年平均风速较小(表 1),一般介于 1.5~3.0m/s 之间,而且存在明显区域差异从东到西逐渐变小,以若羌、塔中、莎车一线为例,年平均风速分别为 2.7m/s、2.3m/s、1.8m/s。

表 1 各站年平均风速

Tab 1 Annual mean wind velocity of each station in Taklimakan Desert								
站名	轮台	库尔勒	库车	铁干里克	巴楚	若羌	莎车	且末
年平均风速 (m/s)	1.6	2.9	2.6	2.2	1.6	2.7	1.8	2.5
站名	安迪尔	皮山	和田	民丰	于田	肖塘	满参	塔中
年平均风速 (m/s)	2.3	1.6	2.1	1.7	1.8	2.5	2.4	2.3

从时间变化来看,各站平均风速春、夏季最大,秋季次之,冬季最小。如果将各月平均风速与平均温度对比,可以发现沙漠边缘与内部存在着明显区别(图2),沙漠内部的肖塘、满参及塔中等3个站的平均风速与平均温度变化存在着明显的同步性,即“风热同步”现象,月平均风速及平均温度均以6~7月份最大,12~1月份最小。而沙漠边缘所有站点的情况与此不同,平均风速最大值一般都出现在4~5月份,而平均温度最大值一般出现在7月份,出现温度变化滞后于风速变化现象。对于塔克拉玛干沙漠内部“风热同步”现象的原因有待于进一步深入研究。但笔者初步认为,这种情况的出现主要与沙漠内部及周边不同下垫面导致的热力性质差异有关。众所周知,在炎热的夏季,沙漠内部成为

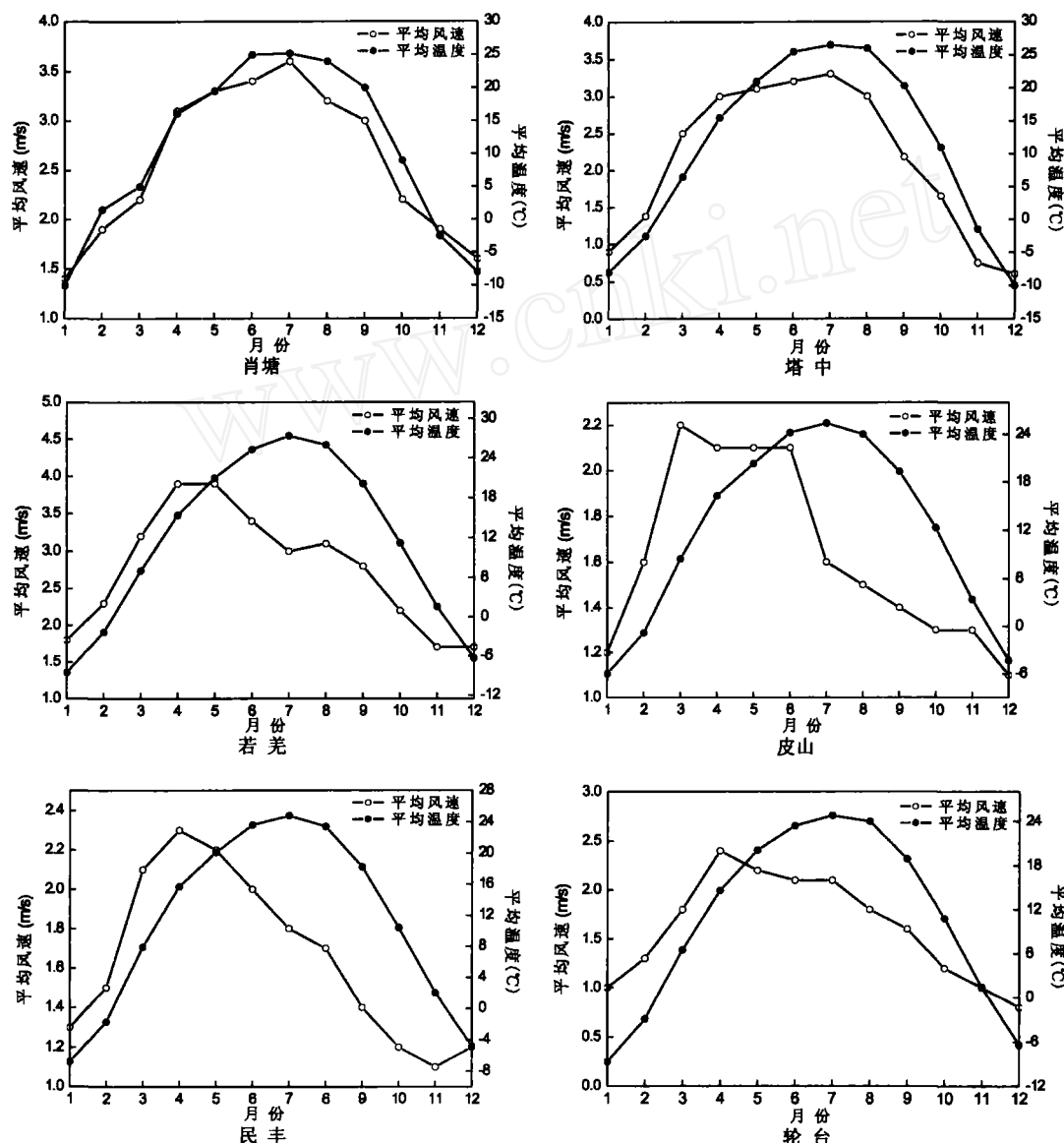


图2 各站平均风速与温度月际变化

Fig. 2 Variations of monthly mean wind velocity and temperature in each station of Taklimakan Desert

巨大的热源，与边缘地区形成较大的温度梯度，导致周边风系向沙漠腹地汇聚，在此过程中风力也会逐步增强，从而使沙漠内部出现了“风热同步”现象。

实际上，这种沙漠内部的“风热同步”不仅体现在平均风速的年内变化，也存在于 1 日内风速变化中。从满参与塔中 2 个站平均风速日变化中可以清楚看到（图 3），不管春、夏、秋、冬，一天之内最小平均风速往往出现在最冷的凌晨时段，随着气温的升高，风速也会逐渐增大，峰值一般都出现在中午 12 00 以后的几个小时之内。

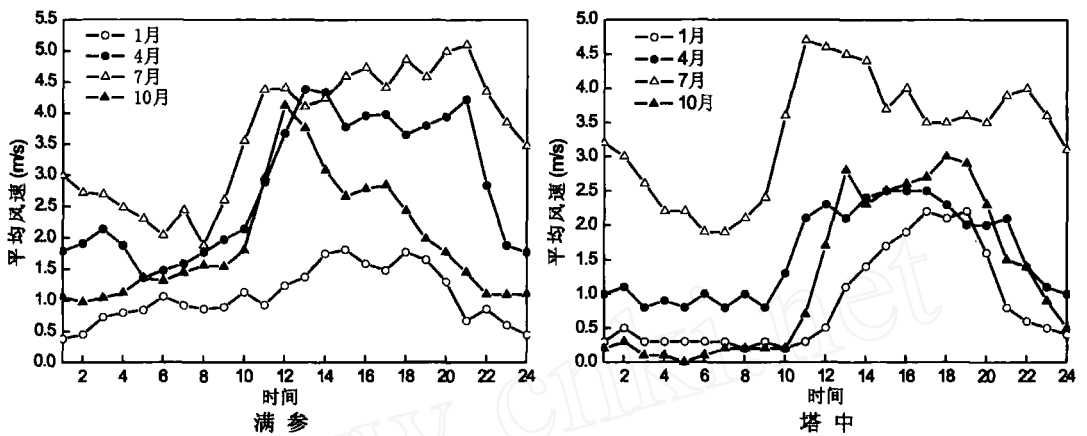


图 3 沙漠内部满参、塔中站 1 日内平均风速变化（1995 ~ 1996 年）

Fig. 3 Mean diurnal wind velocity changes in Mancan and Tazhong of Taklimakan Desert

表 2 塔克拉玛干沙漠各站 16 方位起沙风作用时间（小时）

Tab 2 Duration time of the effective sand-moving winds in each station of Taklimakan Desert

风向 站名	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	合计
阿克苏	0	9	13	24	28	5	2	2	3	3	0	4	29	48	4	1	175
安迪尔	10	11	41	101	55	3	1	6	3	2	21	14	6	4	0	6	284
巴楚	1	28	81	99	9	1	3	0	0	1	2	7	7	10	6	10	265
策勒	4	3	1	3	10	1	1	8	6	4	6	50	133	39	4	3	276
和田	3	1	1	4	6	1	0	2	18	12	5	27	96	112	13	5	306
库车	24	23	9	54	77	23	0	0	0	1	7	15	5	15	8	47	309
麦盖提	36	46	66	49	7	4	0	3	4	2	7	1	7	76	68	40	416
满参	50	63	104	109	105	54	24	6	2	10	14	21	24	25	33	38	677
若羌	8	59	528	524	18	3	2	7	5	24	90	95	16	1	2	2	1384
民丰	7	32	18	8	1	0	1	2	7	8	46	118	66	14	12	9	349
皮山	4	0	0	0	0	1	5	0	4	6	12	1	86	41	65	4	229
莎车	7	2	9	4	0	0	2	2	4	3	2	0	1	13	34	22	106
铁干里克	24	12	54	210	102	96	12	0	0	0	0	0	0	0	12	12	534
尉犁	132	205	46	20	8	28	19	4	1	3	3	2	14	13	7	15	420
肖塘	30	51	49	73	88	70	29	12	3	5	8	8	6	0	19	25	465
于田	2	0	4	3	2	0	2	0	2	6	11	15	39	13	7	0	108
塔中	5	101	28	321	26	85	8	15	4	10	10	56	6	35	5	41	756

### 3 起沙风速

临界起沙风速是研究风沙运动规律、解决风沙工程问题的关键指标之一,它与地表性质有关<sup>[14]</sup>,也因观测时距、观测高度、起动性质的变化而不同<sup>[12]</sup>。表 2 给出了塔克拉玛干沙漠各站点起沙风作用时间。其中若羌起沙风作用时间最长,达到 1384 小时,占全年总时间的 15.8%,最小的是莎车、于田,只有 106 和 108 小时,仅占到全年总时间的 1.2%左右,其它各站从 175~765 小时不等。

上述起沙风作用时间是不同等级风速作用时间总和。图 4 是主要站点不同等级风速作用时间占总时数百分比。显而易见,随着风速等级增加,其比例相应减少,说明风速越大出现频率越小。6.1~7.0m/s 的风速所占比例平均 40%左右,最大的为安迪尔,占到 60.6%,最小的为若羌,占 24.2%;6.1~8.0m/s 平均占到 69.3%,其中沙漠南部的莎车、巴楚、安迪尔等均占 80%以上,东部的若羌、尉犁、铁干里克也占 40%~60%;而 6.1~10.0m/s 的风速平均占总时数的 91%,其中南部的莎车、巴楚、安迪尔占到 99%左右,最小的若羌也占到 71.6%。因此,可以说塔克拉玛干沙漠的起沙风基本上都集中在 6.1~10.0m/s 之间。

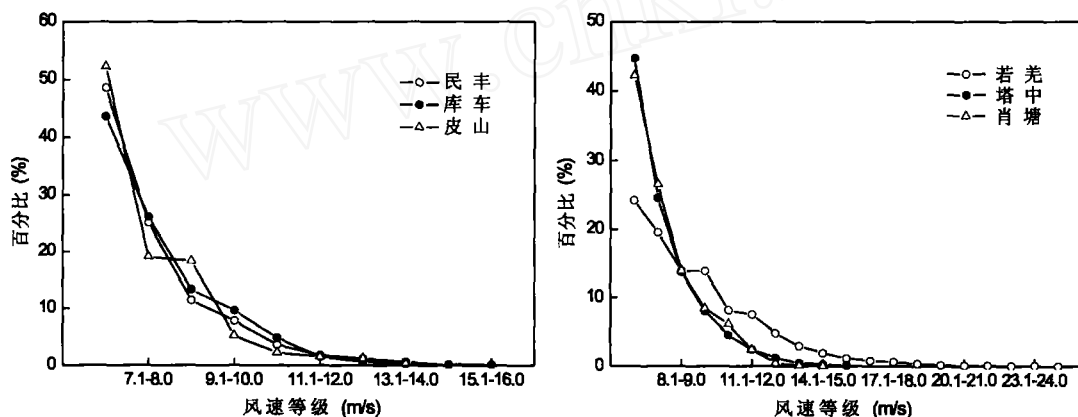


图 4 部分站不同等级起沙风速百分比

Fig. 4 Frequency of different wind velocities in some stations of Taklimakan Desert

### 4 输沙势

输沙势是衡量区域风沙活动强度的重要指标<sup>[15]</sup>,也是目前风沙活动强度计算应用最为广泛的方法<sup>[16,17]</sup>。Fryberger 提出了通用的输沙势计算公式<sup>[18]</sup>:  $DP = V^2 (V - V_t) t$ 。式中,DP 为输沙势,为矢量单位(VU),V 为大于临界起动值的风速, $V_t$ 为临界起动风速,二者单位均为海里/小时,t 为起沙风作用时间,一般以频率表示。他还根据输沙势大小,将区域风环境分为高能(>400VU)、中能(200~400VU)及低能(<200VU)三类<sup>[18]</sup>。

从输沙势计算结果可以看出(图 5),塔克拉玛干沙漠以若羌最大,达到 399.0VU,最小的是莎车,只有 5.4VU,其它各站大多小于 100VU。按照 Fryberger 划分标准,除若羌地区外,塔克拉玛干沙漠整体上处于低风能环境。沙漠东部及中部区域较大,西部及南部较小。

除了区域差异外,每个站点输沙势及其合成也存在着明显的时间变化。以沙漠腹地的



图 5 各站输沙势计算结果

Fig. 5 Calculated results of drift potential in each station of Taklimakan Desert

塔中为例，年输沙势为 114.5VU，合成输沙势为 67.0VU，两组主风向为 ENE 和 NNE，合成输沙方向为 51.5°。输沙势主要集中在 3~7 月，占到全年输沙势的 90%。从 12 月到翌年 2 月，风力微弱，风向单一，主要集中在 ENE 方向。3 月以后，随着风力增强，风向由单一的 ENE 转变为 ENE 和 E 风；4 月以后，风力进一步增强，而风向也由 ENE 和 E 过渡到以 NNE、N 为主，同时 NNW 也占到一定比例，致使合成输沙方向也由 ENE 变成 NNE，这种情况一直持续到 7 月份。8 月以后，风力有所减弱，同时出现了 NNE、NE、ENE 及 SE 几组风向势均力敌的情况。9~11 月，风力进一步减弱，主风向以 ENE、NE 及 ESE 为主，合成方向为 ENE。

5 输沙量

输沙势是衡量区域风沙活动强度和方向的重要指标之一，但实际输沙量的计算对区域沙害防治更有指导意义<sup>[19]</sup>。输沙量的计算依赖于输沙率的精确测定。由于输沙率在空间分布上具有明显的非均一性和随时间变化的非正常性<sup>[20]</sup>，就目前技术水平而言，对一个地区进行长时间输沙总量的连续测定几乎是不可能的。因此，对于较大区域输沙量的计算多通过理论输沙率公式进行。现有的输沙率公式很多<sup>[20~24]</sup>，本文计算中选择的是凌裕泉提出的“最大可能输沙量”<sup>[22,23]</sup>，公式为  $q = 8.95 \times 10^{-1} (V - V_t)^{1.9}$ ，其中 q 为输沙率，单位取  $g \cdot cm^{-1} \cdot min^{-1}$ ，V 为起沙风速， $V_t$  为临界起沙风速。该公式经过风洞实验验证，并且在沙坡头、敦煌莫高窟两地的输沙量计算中，取得了较好结果<sup>[22,23]</sup>。然而，由于该公式中所用临界起沙风速为 5.0m/s（距地面 2m 处），而塔克拉玛干沙漠中各站采用的均为 11.4m 高度，临界起沙风速为 6.0m/s。因此，应用时首先要将该公式进行转化，并得

到下面适用于塔干的输沙率公式： $q = 7.57 \times 10^{-1} (V - V_t)^{1.9}$ 。根据该公式计算输沙率，乘以相应时间，就可以得到各站的最大可能输沙量。

输沙量计算结果显示（表 3），整个沙漠的输沙量差异极大，最小的莎车只有  $450 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ ，而最大的若羌达到  $64213 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ ，二者相差达到 140 倍之多。与输沙势一样，输沙量也呈现出明显的区域分异规律，沙漠东部和中部较大，西部、南部及西南部偏小。沙漠东部边缘和中部的若羌、铁干里克、满参、塔中等站输沙量一般都在  $10000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$  以上，西部的巴楚、麦盖提及莎车等站输沙量从  $450 \sim 5691 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$  不等，而沙漠南部及西南部的民丰、于田、和田、皮山等站输沙量都在  $4000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$  以下。

表 3 各站输沙量计算结果

Tab 3 Calculated results of sand flux in each station of Taklimakan Desert

站名	阿克苏	安迪尔	巴楚	和田	库车	麦盖提	满参	民丰
输沙量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ )	1711	2242	1263	3374	4734	5691	14681	3047
站名	皮山	若羌	莎车	铁干里克	尉犁	肖塘	于田	塔中
输沙量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ )	1836	64213	450	12289	17103	6692	1461	13228

图 6 是主要站点不同等级风速输沙量占总输沙量百分比，从中可以看出，在不同区域，对输沙量贡献最大的风速等级也不尽相同。安迪尔和莎车输沙风主要集中在  $7.0 \sim 9.0 \text{ m/s}$  之间，而若羌以  $9.0 \sim 13.0 \text{ m/s}$  为主，其它站则多集中于  $9.0 \sim 11.0 \text{ m/s}$  之间。这说明，对于输沙量贡献最大的既不是那些较小风速，也不是很大风速，而是中间风速。

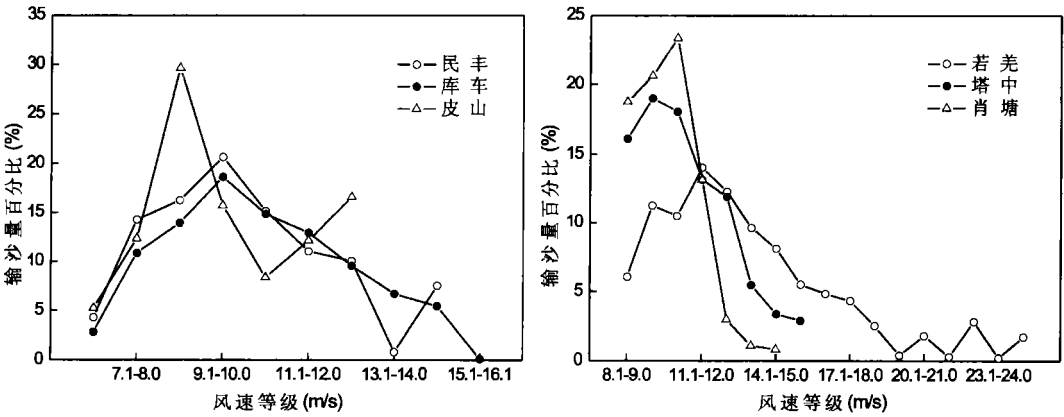


图 6 不同等级风速对输沙量贡献百分比

Fig 6 Contribution ratio of wind velocity with different grades to sand transportation

6 结论与讨论

近地面风沙活动强度是研究风沙地貌形成、演变及进行沙害防治的重要理论依据。本文通过研究初步发现，除若羌地区外，塔克拉玛干沙漠总体处于低能环境，有效起沙风大都集中于  $6.1 \sim 10.0 \text{ m/s}$  之间，而对输沙率贡献最大的风速以  $9.0 \sim 11.0 \text{ m/s}$  为主。风沙活动强度不管在时间还是空间上都存在明显差异，从时间上来说，风沙活动以春夏最大，秋季次之，冬季最小。但沙漠内部存在“风热同步”现象，风沙活动在 6~7 月最强，沙

漠边缘则以 4~5 月最强。起沙风作用时间、输沙势、输沙量计算与分析结果都说明, 风沙活动以东部、中部较强, 西部、南部及西南部较弱。

必须指出, 近地面风沙活动特征是沙漠高空环流形势的体现, 为了更好揭示近地面风沙活动特征, 今后有必要结合不同高度环流形势作更为具体分析, 以便对风沙活动强度的时空差异作出合理解释。其次, 关于“风热同步”现象的实质性原因, 今后应该通过更为全面的实验观测做出科学解释。还有, 研究风沙活动强度最终目的是为了更好指导防沙实践, 因此今后应该将其与沙丘活动程度结合, 为区域沙害防治提供更为合理依据。

### 参考文献:

- [1] Skidmore E L. Soil erosion by wind. In: El-Baz F, Hassan M H A. Physics of Desertification. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers. 1986. 261~273.
- [2] 朱震达. 中国沙漠、沙漠化、荒漠化及其治理对策. 北京: 中国环境出版社, 1999. 113~115.
- [3] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学. 北京: 科学出版社, 1995. 122~132.
- [4] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学. 北京: 科学出版社, 2003. 315~316.
- [5] 朱震达. 风力作用下沙丘演变动态过程中若干问题的初步研究. 见: 地理集刊第 4 号. 北京: 科学出版社, 1963. 58~78.
- [6] 朱震达. 塔克拉玛干沙漠西南地区绿洲附近沙丘的移动规律. 地理学报, 1964, 30(1): 33~47.
- [7] 朱震达, 陈治平, 吴正, 等. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究. 北京: 科学出版社, 1981. 27~95.
- [8] 凌裕泉. 塔克拉玛干沙漠的流场特征与风沙活动强度的关系. 中国沙漠, 1988, 8(2): 25~37.
- [9] Dong Z B, Wang X M, Chen G T. Monitoring sand dune advance in the Taklimakan Desert. Geomorphology, 2000, 35: 219~231.
- [10] Wang X M, Dong Z B, Zhang J W, *et al.* Geomorphology of northeast Taklimakan Sand Sea. Geomorphology, 2001, 42: 183~195.
- [11] Wang X M, Dong Z B, Zhang J W, *et al.* Relations between morphology, air flow, sand flux and particle size on transverse dunes, Taklimakan Sand Sea, China. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, (5): 515~226.
- [12] 陈渭南, 董治宝, 杨佐涛, 等. 塔克拉玛干沙漠的起沙风速. 地理学报, 1995, 50(4): 360~367.
- [13] 李振山, 陈广庭. 塔克拉玛干沙漠起沙风况. 中国沙漠, 1999, 19(1): 43~45.
- [14] 陈广庭, 冯起. 塔里木盆地沙漠石油公路沿线风沙环境的形成与演变. 北京: 中国环境科学出版社, 1997. 112~130.
- [15] Bullard J E. A note on the use of the 'fryberger method' for evaluating potential sand transport by wind. Journal of Sedimentary Research, 1997, 67: 499~501.
- [16] Lancaster N. Wind and sand movement in the Namib sand sea. Earth Surface Processes and Landforms, 1985, 10: 607~619.
- [17] Livingstone I, Warren A. Aeolian Geomorphology: an Introduction. London: Addison Wesley Longman Limited, 1996. 22~23.
- [18] Fryberger S G. Dune form and wind regime. US Geological Survey Professional Paper, 1979, 1052: 137~169.
- [19] Lancaster N, Helm P. A test of a climatic index of dune mobility using measurement from the southwestern United States. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25: 69~82.
- [20] Bagnold R A. The movement of desert sand. Proceedings of the Royal Society of London, Series A. 1936. 157, 594~260.
- [20] Bagnold R A. The movement of desert sand. Geographical Journal, 1936, 85: 343~369.
- [21] Lettau L, Lettau H. Bulk transport of sand by barchans of Pampa de la Joya in southern Peru. Zeitschrift für Geomorphologie NF, 1978, 13: 182~195.
- [22] 凌裕泉. 输沙量(率)水平分布的非均一性. 实验力学, 1994, 9(4): 352~356.
- [23] 凌裕泉. 最大可能输沙量的工程计算. 中国沙漠, 1997, 17(4): 362~368.



- [24] 尤联元, 卢金发, 陈浩等. 以防沙治沙为目标的土地利用方式调整——以内蒙古自治区多伦县为例. 地理研究, 2003, 22(6): 681~686.

## The intensity of sand-drift activities in Taklimakan Desert

ZU Rui-ping, ZHANG Ke-cun, QU Jian-jun

(Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The intensity of sand-drift activities is the important theoretic base for both studying the formation and evolution of aeolian geomorphology and carrying out the sand-damage control measures. Based on statistics and calculations of wind data, this paper studied the intensities of the sand-drift of Taklimakan Desert and drawn some preliminary conclusions as follows: Except Ruoqiang district, the whole Taklimakan Desert belongs to low-energy environment and the drift potential in most areas is less than 200VU. With the increase of wind velocity, its frequency decreases gradually, so the most effective sand-moving winds range from 6.1 m/s to 10.0 m/s, but the most contributors to sand flux concentrate between 9.0 m/s and 11.0 m/s. The intensity of sand-drift activities has great temporal and spatial variations. As seasons concerned, the sand-drift activity is the strongest during spring and summer and is the weakest in winter, and the autumn lies between them. However, in the interior of the desert there is a phenomenon called as "wind-temperature synchronization", that is, the monthly mean temperature and wind velocity get their maximum values during June and July. On the fringe of the desert, the maximum temperature occurs in June and July, while the maximum wind velocity in April and May. According to the calculated results of drift potential and sand flux, the intensity of sand-drift activities is stronger in the central and eastern parts than that of western, southern and southwestern parts.

Although this study has got some results, there is still some important work to carry out in future. At first, to give a rational explanation of the temporal and spatial variations of the intensity of sand-drift activities, in combination with the circulation patterns at different elevations. Secondly, to give a detailed explanation of the "wind-temperature synchronization" phenomenon through scientific experiments. And finally, to integrate the intensity of sand-drift activities with the degree of sand dune activities, so as to provide more effective base for sand-damage control measures.

**Key words:** mean wind velocity; effective sand-moving winds; drift potential; sand-transportation intensity; Taklimakan Desert