

文章编号:1006 - 7639(2003) - 03 - 0058 - 05

# 沙尘天气的定量化指数及其应用

张冬斌<sup>1</sup>, 尚可政<sup>1</sup>, 王式功<sup>1</sup>, 杨德保<sup>1</sup>, 赵燕宁<sup>2</sup>

(1. 兰州大学资源环境学院 大气科学系, 甘肃 兰州 730000; 2. 青海省气象台, 青海 西宁 810001)

**摘要:**按照《地面气象观测规范》规定,能见度  $VV$  与风速  $V$  是对沙尘天气进行分级的重要指标。我们利用能见度和风速构造沙尘指数,用以衡量沙尘现象的强弱,并通过它对时间和空间的累积来分析某一地区的沙尘天气发生状况。结果表明:所构造的指数能够代表我国沙尘天气多发区的沙尘天气状况。对上游沙区的沙尘指数与下游邻近城市空气污染指数所作的相关分析显示:二者间存在较为密切的关系。因此,利用上游沙区的沙尘指数作为下游邻近城市空气污染预报的重要因子。

**关键词:**沙尘指数;消光系数;特征强度;污染预报

**中图分类号:** P445.4

**文献标识码:** A

沙尘天气是干旱气象条件下的产物。从全球范围来看,主要发生在中亚、北非、澳大利亚和北美洲大陆<sup>[1]</sup>,但影响区域却涉及到全球的各个角落,即使南北两极地区也有它们的痕迹。国外有关学者(Sutton, 1925; Chou, 1936; Martin, 1937)<sup>[2~4]</sup>早在 20 世纪 20 和 30 年代就开始对此进行研究。上世纪 90 年代以来,沙尘暴发生的频率有增加的趋势,造成的损失也越来越严重,特别是 1998 年 4 月中旬发生在蒙古国南部和中国北方的特强沙尘暴,其卷起的大量沙尘不仅影响了临近的朝鲜和日本等国家,而且还飘洋过海影响到北美洲大陆,引起广泛关注<sup>[5~7]</sup>。

在我国,对沙尘现象强弱的衡量主要是依据《地面气象观测规范》<sup>[8]</sup>(以下简称《规范》),它将沙尘天气划分为:浮尘——尘土、细沙均匀的浮游在空中,使水平能见度  $< 10.0\text{km}$ ;扬沙——由于大风将地面尘沙吹起,使空气相当混浊,水平能见度在  $1.0\text{km}$  至  $10.0\text{km}$  以内;沙尘暴——由于强风将地面大量尘沙吹起,使空气很混浊,水平能见度  $< 1.0\text{km}$ 。这种分级法,虽然在一定程度上反映了沙尘现象的强弱,但没有给出确定的量值,给沙尘天气的深入研究带来诸多不便。关于风对起沙、运输等过程的影响,前人已做过一定的研究,如 Bagnold 的风

沙物理研究<sup>[9]</sup>, Gillette 所做的风洞实验<sup>[10]</sup>, Nickling 对沙粒传输的研究<sup>[11]</sup>。国内一些学者研究了不同气象条件下气溶胶粒子的谱分布与相关特征量<sup>[12~15]</sup>。然而,到目前为止,还没有对沙尘现象给出一个定量化指数。因此,我们参照已有的研究成果,并结合我国台站气象观测的实际情况,尝试构造一种沙尘指数。

## 1 沙尘指数的构造

### 1.1 基本思路

对于沙尘指数  $\phi$  的构造,有两个基本要求: $\phi$  值应能与时空单点相对应:即没有沙尘现象时, $\phi$  应足够小;出现沙尘现象时, $\phi$  为一显著大值,并且其大小能反映沙尘现象的强弱; $\phi$  在总体上(某一时段、某一地区)也应与实际情况基本相符。

$$\text{令 } S_1 = \int \phi d, S_2 = \int \phi dt, S = \int \phi d dt$$

$S_1$  反映在同一时刻,某一地区的风沙状况; $S_2$  反映某一地点,某一时段上的风沙状况; $S$  应能反映某一地区、某一时段总体上的风沙状况。

鉴于各台站的实际观测记录均是离散数据,我们用求和来代替积分。

$$S_1 = \sum_i \phi, S_2 = \sum_t \phi, S = \sum_t \sum_i \phi(i, t) \quad \text{分别表示对站点、时次的求和)。$$

收稿日期:2003 - 07 - 22; 改回日期:2003 - 09 - 25

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G2000048703)、中国科学院 - 日本文部科学省合作项目、国家自然科学基金重大项目(39990490)和科技部社会公益类项目(中国西北地区沙尘暴监测预警系统)共同资助。

作者简介:张冬斌(1977 - ),男,兰州大学大气科学系在读硕士研究生,主要从事风沙灾害方面的研究。

沙尘现象的强弱,主要体现在两个方面:空气中的沙尘含量;强风与沙粒吹蚀所具有的破坏力。 $\phi$  表达式应能体现这两点。

### 1.2 用消光系数表征质量项

根据能见度的定义有:

$$VV = \frac{3.912}{\sigma} \quad (\sigma \text{ 为消光系数}) \quad (1)$$

设空气中气溶胶粒子的化学成分单一,且均为球形。

按 Mie 散射理论,  $\sigma = \int_0^\infty \pi a^2 n(a) k(a, m) da$ 。式中  $n(a)$  为粒子数浓度,在沙尘现象中, $n(a)$  受起沙、运输、凝并、沉积诸效应影响。可以断定, $n(a)$  必然与风场有关。 $k(a, m)$  为消光效率, $m$  为粒子折射指数。

Friedlander 提出<sup>[16]</sup>:如果气溶胶粒子的谱分布可用幂定律来表示  $n(a) \sim a^{l-1}$ ,

$$\text{则 } AA_1^{-3} \cdot N^{-\frac{4}{3}} \cdot V^{-\frac{1}{3}} \quad (2)$$

其中  $N = \int_0^\infty n(a) da$ ,  $V = \int_0^\infty a^3 n(a) da$ ,  $A$  为无量纲因子, $A_1$  为计算中产生的常数。若粒子的“密度”与其尺度无关,则  $V = m_c$ 。当  $l=4$  时, $m_c$  它能很好地反映空气中气溶胶粒子的含量。

Hagen<sup>[17]</sup>也曾推得  $VV = 58.1/m_c$ ,即  $m_c$ 。

实际沙尘现象不一定完全满足他们所取的近似条件,但我们仍可以用  $m_c$  来代替  $m_c$ 。

以上考察了单一化学成分气溶胶粒子造成的散射效应。如果在沙尘现象的全过程中,空气中水汽含量较低,且没有太多的污染性气体或盐类气溶胶,则消光主要由沙尘粒子的散射引起。

但在实际计算中发现:当出现降水天气时,沙尘粒子对  $\phi$  的贡献并不显著,水汽的作用居主要地位。针对上述问题,我们必须设法滤除液滴的消光作用。

如果液滴和其它因素的消光效应具有“独立性”(不考虑水汽引起的粒子辐射特性的变化),则

$$F = F_0 e^{-\sigma_1} e^{-\sigma_2} \quad (3)$$

令  $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$  ( $\sigma_1$ :液滴造成的消光系数, $\sigma_2$ :其它因素造成的消光系数)。

我们所要做的就是从  $\sigma$  中剔除  $\sigma_1$ ,用  $\sigma_2 = \sigma - \sigma_1$  来代替其它因素(主要是气溶胶粒子)的消光效应。

对  $\sigma_1$  可以运用 Mie 散射理论进行计算,但存在一些困难,我们采用如下方法简化处理:

当出现大雾或显著性降水时,假设  $\sigma_1 = \sigma$ ,则  $\sigma_2 = 0$ 。

未出现上述情形,假设  $\sigma_1 = 0$ ,则  $\sigma_2 = \sigma$ 。计算中,通过天气现象记录  $f$  来控制  $\sigma_2$  的取值。

$$\text{令 } G(f) = \begin{cases} 0 & (\text{出现大雾或显著性降水}) \\ 1 & (\text{其它}) \end{cases}$$

实际操作中,取集合  $M = [10, 16] \cup [20, 26] \cup [36, 86] \cup [90, 97]$  (天气现象记录  $f$  位于以上数字区间时为降水或大雾天气)

$$G(f) = \begin{cases} 0 & (f \in M) \\ 1 & (f \notin M) \end{cases}$$

从而  $\sigma_2 = \sigma \cdot G(f)$ 。

故而,我们用  $\sigma_2$  来表征  $m_c$ 。

### 1.3 $\phi$ 表达式的选取

Bagnold 提出<sup>[9]</sup>:输沙率  $q \propto u^3 \cdot (V - V_0)^3$ , Gillette 发现粒子传输的水平通量  $q \propto u^3$ <sup>[10]</sup>,垂直通量  $F \propto u^4$ <sup>[18]</sup>。我们取  $\phi = m_c q$ 。用  $\sigma_2$  来代替  $m_c$ ,  $(V - V_0)^3$  来代替  $q$ 。则

$$\phi = \sigma_2 \cdot (V - V_0)^3 = \sigma \cdot G(f) \cdot (V - V_0)^3 = \frac{3.912}{VV} \cdot (V - V_0)^3 \cdot G(f) \quad (4)$$

这里  $q \propto (V - V_0)^3$  所取模型,严格来讲应为风吹过均匀干燥的沙面,对一般陆面可能会产生误差。对于下垫面状况比较复杂的地区,还应考虑地形、地貌、植被、干燥度、水汽诸种因素。

我们采用该形式,是因为它既包括质量项,又包括速度项。用于沙面固然适合  $q$  的含义,用于其它陆面也能体现出  $\phi$  随  $m_c$  及  $V$  增大而呈现大值这一特点。

由于  $VV \in [0, +\infty)$ ,当  $VV = 0$  时, $\phi$  值发散,相应的  $S$  值也无法计算。

令  $\frac{1}{x} = \frac{1}{x}$ ,  $x \in [0, +\infty)$ ,取  $I = \int_0^\infty \frac{1}{x} dx$ ,积分发散。

若用  $f(x)$  代替  $\frac{1}{x}$ ,  $I = \int_0^\infty f(x) dx$ 。我们要求: $f$

( $x$ ) 能与  $\frac{1}{x}$  实现单调对应,积分收敛。

分析几种简单的函数形式,容易看出:

当  $f(x) = \frac{1}{x^p}$  ( $p > 0$ ) 时,  $I = \int_0^\infty \frac{1}{x^p} dx$  发散。

当  $f(x) = \frac{1}{e^{kx}}$  ( $k > 0$ ) 时,  $I = \int_0^\infty \frac{1}{e^{kx}} dx = \frac{1}{k}$  收敛。

故而我们试用  $\phi = e^{-k} \cdot (V - V_0)^3 \cdot G(f)$  (5)

来计算。另外,选用  $\phi = \frac{1}{+0.01} \cdot (V - V_0)^3 \cdot G(f)$  与之比较。

当  $VV > 0.1, VV + 0.01 > VV$ ; 当  $VV = 0$  时,  $VV + 0.01 > 0.01$ 。

### 2 沙尘指数与实际沙尘天气状况对比分析

选用 2002 年 1 月 1 日~4 月 30 日每日 8 个时次的地面资料。(由于存在漏缺,实际仅为 901 个时次的资料。并剔除  $VV$ 、 $V$ 、 $f$  中任一个的观测记录出现漏缺的一组记录。)

$$\text{令 } \phi_1 = \frac{1}{+0.01} \cdot (V - V_0)^3 \cdot G(f), \phi_2 = e^{-k} \cdot (V - V_0)^3 \cdot G(f) \quad (6)$$

令  $P_1 = B_1(f) G(f)$ , 为直接从地面天气报中解释出的沙尘天气,  $P_2 = B_2(V, f) G(f)$ , 为根据正点观测的风速和能见度, 按《规范》中沙尘天气的定义给出

的沙尘天气类型。

$$B_1(f) = \begin{cases} 0 & (\text{其它}) \\ a_1 & (f = 6) \\ a_2 & (f = 7) \\ a_3 & (f = 9, 30 - 35) \end{cases}$$

$$B_2(V, f) = \begin{cases} 0 & (\text{其它}) \\ a_1 & (V \leq 10, f < 8) \\ a_2 & (V \leq 10, f \geq 8) \\ a_3 & (V \leq 1, f \geq 10) \end{cases}$$

计算中参数取值:  $k = 1, V_0 = 6, a_1 = 1, a_2 = 3, a_3 = 9$ 。为了检验  $P_1, P_2$  对实际沙尘天气的代表程度, 我们将  $P_1, P_2, P_1, P_2$  按全国 10 个站区(图 1)作区平均, 形成从 2002 年 1 月 1 日至 2002 年 4 月 30 日时间序列(901 个样本), 并进一步计算各序列之间的相关系数(表 1)。

表 1  $P_1, P_2, B_1, B_2$  之间的相关系数

Tab. 1 The correlation coefficients between  $P_1, P_2, B_1$  and  $B_2$

相关系数	50 区	51 区	52 区	53 区	54 区	55 区	56 区	57 区	58 区	59 区
$P_1 - B_1$	0.037	0.281 ***	0.620 ***	0.349 ***	0.304 ***	0.144 ***	0.093 **	-0.011	-0.014	-0.007
$P_1 - B_2$	0.091 **	0.321 ***	0.633 ***	0.398 ***	0.296 ***	0.147 ***	0.042	-0.010	-0.012	-0.034
$P_2 - B_1$	0.616 ***	0.348 ***	0.664 ***	0.751 ***	0.772 ***	0.655 ***	0.646 ***	-0.002	0.062 **	0.288 ***
$P_2 - B_2$	0.313 ***	0.390 ***	0.679 ***	0.784 ***	0.685 ***	0.701 ***	0.304 ***	0.017	0.102 ***	0.076 *
$B_1 - B_2$	0.440 ***	0.840 ***	0.965 ***	0.966 ***	0.892 ***	0.834 ***	0.365 ***	0.378 ***	0.360 ***	0.123 ***

注: \*, \*\*, \*\*\*; 分别表示通过了  $\alpha = 0.05, 0.01, 0.001$  显著性水平检验。

从表 1 中可看出:

在沙尘天气多发的北方沙区(51~55 区),  $B_1$  与  $B_2$  之间的相关非常好(相关系数均  $> 0.83$ ), 说明沙尘天气发生具有一定的连续性, 因而正点观测基本能够反应出区内沙尘天气的全天情况。在沙尘天气少发的南方及东北(50, 56~58 区),  $B_1$  与  $B_2$  之间的相关也在 0.36 以上, 正点观测能够大致反应

出区内沙尘天气的全天情况。

在 50~56 区,  $P_1, P_2$  与  $B_1, B_2$  之间呈现较明显的正相关性, 因此, 在沙尘天气多发区可以用  $P_1, P_2$  代表区内沙尘天气状况。

在 50~56 区,  $P_2$  与  $B_1, B_2$  之间的相关明显高于  $P_1$  与  $B_1, B_2$  之间的相关, 因此, 用  $P_2$  作为沙尘天气指数更好一些。

### 3 沙尘指数在城市颗粒物污染预报中的应用

根据王式功<sup>[19]</sup>等人的研究, 全国沙尘暴天气易发区可分为 7 个亚区: 1 北疆区、2 南疆区、3 河西区、4 柴达木盆地、5 河套区、6 东部区、7 青藏区。为了便于表述, 令:  $X_i$  表示 1~7 沙尘天气区观测站  $2$  的时间、空间平均。即:

$$X_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \phi_{i, k} / nk (i = 1, 2, \dots, 7) \quad (7)$$

$n$  为计入的站点数,  $k$  为一天中观测次数。为了搞清楚城市空气污染指数是否与其上游的沙区出现沙尘天气有密切的关系, 我们以西宁、呼和浩特、西安、

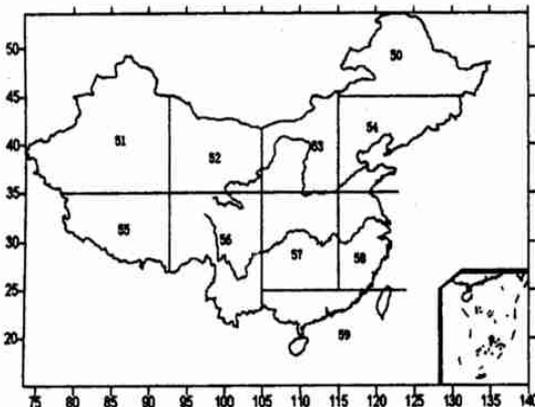


图 1 中国气象区站划分图

Fig. 1 The distribution of regional partition of meteorological observing stations in China

北京、长春为例,将空气污染指数与其对应沙区(青藏区除外)的沙尘指数作相关分析。空气污染资料为 2002 年 1 月 1 日~4 月 30 日上述几个城市的空气质量日报颗粒污染物  $PM_{10}$ 。经过整理,沙尘天气与空气污染配套的有效样本为 115 个。初步的计算表明城市  $PM_{10}$  与当日上游区沙尘指数相关并不明显,而与前一天沙尘相关最好。西宁等 5 城市空气污染指数与上游沙尘天气区前一天沙尘天气指数之间相关分析情况见表 2。

表 2 中国北方 5 城市颗粒污染物  $PM_{10}$  与相应上游沙区沙尘指数的相关分析

Tab. 2 the correlation analyses between dust index and urban air pollution index of 5 cities in northern China

城市	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
西宁	-0.016	0.049	0.263**	0.126		
呼和浩特	-0.012	0.049	0.280**	0.279**	0.219*	
西安	0.006	0.063	0.226*	0.199*	0.150	
北京	0.005	-0.046	-0.034	0.383**	0.715**	0.720***
长春	-0.018	-0.071	-0.066	0.416**	0.926**	0.943***

注: \*、\*\*、\*\*\*;分别表示通过了  $\alpha=0.05, 0.01, 0.001$  显著性水平检验。

由表 2 可以看出,北疆、南疆的沙尘天气对西宁市影响小,河西区最明显;北疆、南疆的沙尘天气对西安、呼和浩特影响小,河西区、柴达木区和河套区的沙尘天气对其都有一定影响;对于北京和长春市,北疆、南疆、河西区的沙尘天气对其影响小,而柴达木区、河套区、东部区的沙尘天气对其影响则明显,特别是河套区、东部区的沙尘天气影响非常显著。说明距离城市近的沙尘天气区比远离城市的沙尘天气区对城市空气质量的影响要大。因此,上游沙尘天气区的沙尘天气指数,可作为下游邻近城市空气质量预报的重要因子。

## 4 结论与讨论

综上所述,可分析归纳如下几点:

(1) 文中从消光系数出发,利用台站对能见度 and 风速的观测值构造的沙尘指数  $\phi$ ,能够反映出沙尘天气发生与否及其强弱。

(2) 上游沙区的沙尘指数与下游邻近城市空气污染指数的相关分析显示:二者间存在较为密切的关系,因此上游沙区的沙尘指数可作为下游邻近城市颗粒物污染预报的重要因子。

(3) 从上文中还可看出,有些问题并没有完全解决,如:

(a)  $\phi$  指数的衡量效果并非十全十美,其形式还不够完善。表达式中参数  $V$  与  $k$  的取值具有可调性。另外,  $a_1, a_2, a_3$  的取值也可能影响到  $\phi$  指数的衡量效果。

(b) 我们从消光系数出发,推得了  $\phi$  表达式:  $\phi = -(V - V_0)^3$ 。但是,这是在对空气中的各种消光现象作了一系列简化与近似后,才得到:  $m_c$ 。因此,它具有一定的近似程度。

(c) 对于  $a_1, a_2, a_3$  的取值,严格来讲应由理论推导或实验给出。在实际操作中,我们也可采用其它途径。这 3 个特征强度值对应沙尘天气的 3 个级别,当分级更加细致时,所取的特征强度值也应作相应的改变。

### 参考文献

- [1] 颜宏. 全国沙尘暴天气研讨会会议总结[J]. 甘肃气象, 1993, 11(3): 6 - 11.
- [2] Sutton L J M A, A Inst P. Haboobs[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1925, 51(213): 25 - 30.
- [3] Chou H F. Duststorms in the Southwestern Plains Area[J]. Monthly Weather Review, 1936, 64(6): 195 - 203.
- [4] Martin R J. Duststorms of January - April 1937 in the United States[J]. Monthly Weather Review, 1937, 65(4): 151 - 152.
- [5] Husar R B, Tratt D M, Schichtel B A, et al. Asian dust events of April 1998[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(16): 18317 - 18330.
- [6] Itsushi Uno, Hiroyasu Amano, Seita Emori, et al. Trans - Pacific yellow sand transport observed in April 1998: A numerical simulation[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(16): 18331 - 18344.
- [7] Toshiyuki Murayama, Nobuo Sugimoto, Itsushi Uno, et al. Ground - based network observation of Asian dust events of April 1998 in east Asia[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(16): 18345 - 18359.
- [8] 中央气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 1979. 22.
- [9] R. A. Bagnold. 风沙和荒漠沙丘物理学[M]. 钱宁译. 北京: 科学出版社, 1959. 60 - 70.
- [10] Gillette. A wind tunnel simulation of the erosion of soil[J]. Atmospheric Environment, 1978, 12: 1735 - 1743.
- [11] Nickling W G, Gillies J A. Dust emission and transport in Mali, West Africa, 1993.
- [12] 王明星, 任丽新, 吕位秀, 等. 北京 - 月大气气溶胶的化学成分及其谱分布[J]. 大气科学, 1986, 10(4): 46 - 54.
- [13] 牛生杰, 章澄昌, 孙继明. 贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱分布的观测研究[J]. 大气科学, 2001, 25(2): 243 - 252.
- [14] 许黎. 对流层平流层气溶胶粒子的形态与化学组成[J]. 气象学报, 1998, 56(2): 551 - 559.
- [15] 许黎, 田岗菊夫, 张鹏, 等. 北京地区春末 - 秋初气溶胶理化

- 特性的观测研究[J]. 大气科学, 2002, 26(3): 401 - 411.
- [16] Friedlander S K. 烟、尘和霾[M]. 常乐丰译. 北京: 科学出版社, 1983. 150.
- [17] Hangen L J. Wind erosion and visibility problems. Annual meeting, Ame. Soc. of Agri. Engi. 1976.
- [18] Gillette Passi. Modeling dust emission caused by wind erosion[J]. J Geophys Res, 1988, 93: 14233 - 14242.
- [19] 王式功, 王金艳, 周自江, 等. 中国沙尘天气的区域特征[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 193 - 200.

## The Rationing Index of Dust - stormy Weather and Its Application

ZHANG Dong - bin<sup>1</sup>, SHANG Ke - zheng<sup>1</sup>, WANG Shi - gong<sup>1</sup>, YANG De - bao<sup>1</sup>, ZHAO Yan - ning<sup>2</sup>

(1. Department of Atmospheric Science, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China  
2. Meteorological Observatory of Qinghai Province, Xining 810001, China)

**Abstract:** According to "the criterion of surface meteorological observation", visibility and wind speed are important targets to classify dust - stormy weather. Using the data of visibility and wind speed observed in meteorological stations, we try to construct dust - stormy weather index to determine the intensity of dust - stormy weather phenomenon, moreover we can measure the strong or weak state of dust - stormy weather happened anywhere. We have obtained the following conclusions: the dust - sand index can correspond with the intensity of dust - stormy weather; our analysis to state of dust - stormy weather in different area is in correspondence with real weather facts. The correlative analysis between sand - dust index and urban air pollution index indicated their affinity. It is possible to build urban air pollution statistical forecasting model with the sand - dust index.

**Key words:** Sand - dust index; Extinction coefficient; Characteristic intensity; Air pollution forecasting