

A Descriptor for the Local Dust Storm Occurrence Probability Constituted by Meteorological Factors

Wanyuan Li^{1,2,3*}, Shihua Lv¹, Zhibao Dong², Shigong Wang³,
Zhibao Shen¹, Yuchun Chen¹, Ye Yu¹, Yinhuan Ao¹

¹Key Laboratory for Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou

²Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou

³Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou
Email: ywl@lzb.ac.cn

Received: Jul. 11th, 2011; revised: Aug. 1st, 2011; accepted: Aug. 28th, 2011.

Abstract: Based on the daily data sets of 17 meteorological factors during the period of 1954-2005 for 60 gauge stations distributed over Gansu Province of China and the corresponding dust storm records, the dust storm probabilities related to different classes of each factor have been calculated and analyzed. On the basis of the analysis, a meteorological descriptor quantifying the daily dust storm happening probability for each station, which is referred to as the dust storm occurrence probability index (DSOPI), has been effectively established. According to the statistical characteristics of DSOPI for each station, a feasible judging criterion for a dust storm event, which can greatly contribute to forecasting dust storms and filling up the unavailable historic dust storm records, has been determined. The average daily dust storm probability related to each factor on the dust storm day has been specially analyzed for all the stations, indicating that, generally, the more significant one factor's influence on dust storms, the greater its contribution to them; each factor's contribution greatly varies from place to place; among all the involved 17 factors, the maximum and mean wind speeds, the maximum-speed wind direction, the sunny hours, evaporation, the mean and smallest relative humidity, the lowest surface air pressure and the vapor pressure contribute to dust storm events in Gansu Province most greatly in order.

Keywords: Meteorological Factor; Dust Storm Happening Probability Index; Criterion for a Dust Storm Event

用气象要素确立的当地发生沙尘暴的可能性指数

李万源^{1,2,3*}, 吕世华¹, 董治宝², 王武功³, 沈志宝¹, 陈玉春¹, 余 晔¹, 奥银焕¹

¹中国科学院寒区旱区环境与工程研究所寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州

²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

³兰州大学半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州

Email: ywl@lzb.ac.cn

收稿日期: 2011年7月11日; 修回日期: 2011年8月1日; 录用日期: 2011年8月28日

摘 要: 本文利用甘肃省 60 个测站 1954~2005 年间春季 17 个气象要素处于不同大小等级时沙尘暴发生的频率, 有效建立了表征和判断某日沙尘暴发生可能性的气象指数, 并据此给出判断某日沙尘暴能否发生的气象判据, 为预报沙尘暴和填补历史资料提供了一条新途径。分析表明: 一般而言, 要素与沙尘暴的关联程度越大, 其对沙尘暴事件能否发生的影响强度也越大; 各要素与沙尘暴的关联程度及其对后者的影响强度具有明显的区域性差异; 就全省而言, 所研究要素中最大风速、风速、最大风速风向、日照时数、蒸发量、相对湿度、最小相对湿度、最低气压以及水汽压与沙尘暴的关联程度最大, 它们对沙尘暴的影响强度也是最大的。

关键词: 气象要素; 沙尘暴发生可能性指数; 有无沙尘暴判据

1. 引言

沙尘暴事件特有的危害性气象、环境和生态效应

已为科研人员、政府乃至民众所熟知。能够即时、准确地预报、评估沙尘暴事件及其危害程度是所有沙尘

暴研究工作的最终目的^[1-24]。研究历史是预报、评估工作中不可缺少、甚至是最重要的环节。依据历史上沙尘暴事件发生时及发生前后土壤、地表及气象状况的变化特征及其与无沙尘暴天气的相应对比情况,即可断定沙尘暴发生的土壤、地表及气象条件^[1,18]。一般而言,沙尘暴的发生必须具备三个基本条件:充足的沙源、足够强的大风以及大气的不稳定层结^[2-5,8,11,20];就某地而言,有无沙源往往是不变的,因而气象条件就成为影响沙尘暴发生与否的决定性因子。根据气象条件来断定沙尘暴能否发生是沙尘暴预报的重要和必然途径^[1,18]。

随着全球变暖,干旱、荒漠化有所加重,沙尘暴事件已倍受关注,不少科学家已对之作广泛、深入的讨论,这些工作大多集中于沙尘暴频次的时空变化特征及其地理和气象成因,还有针对沙尘暴事件的地理和气象条件、沙尘释放、输送和沉降过程及其环境、天气或气候效应等各个方面的数值模拟研究,但所得结论往往是定性的,且很难直接应用于预报实践,历史资料中潜藏的大量预报信息没有被充分地挖掘出来^[1-24]。

为此,有必要建立某种桥梁,使表征气象条件的气象要素与沙尘暴事件发生的可能性直接、定量地联系起来,然后以此为基础,直接通过气象要素来判定特定气象条件下沙尘暴能否发生。为了搭起这一桥梁,本文拟建立一个基于气象要素的、能够表征沙尘暴发生可能性大小的气象指数,该指数将具有以下特征: 1) 尽可能囊括所有表征气象条件的典型要素; 2) 尽可能全面考虑各要素对沙尘暴的影响方式和影响强度; 3) 能够合理量化一定气象条件下沙尘暴发生的可能性; 4) 能够合理表征要素与沙尘暴发生可能性的定量关系。该气象指数可使我们能够直接由气象要素来判断沙尘暴发生的可能性,其理论和实践意义不言而喻。

我国大多数沙尘暴发生在春季(3~5月)的西北干旱半干旱区,甘肃省(特别是其西北和中部地区)是该区最易受沙尘暴袭击的区域之一^[1,3,5,7-15],且该省的气象和沙尘暴数据比较齐全,为了简洁行文又不失代表性,本文将选取甘肃省的春季沙尘暴作为研究对象,应用丰富的气象和沙尘暴资料,试图建立一套能够定量表征或评判沙尘暴发生可能性的综合气象指数,使其日值与当日有无沙尘暴事件很好地联系起来,并据

此建立能够有效判定某日某地(站)沙尘暴能否发生的气象判据,一方面为沙尘暴预测提供一条新途径,另一方面也可凭此判据合理填补沙尘暴的历史空记录。

表征气象条件的要素很多,其作用于沙尘暴的途径各不相同:如决定起沙(尘)及沙尘输送动力的风速^[1,4,5,20,23]、气压及大气层结稳定度^[1,3,19-21],以及决定地表起沙(尘)临界的土壤湿度或干燥度及其影响因子(如地表蒸发量、干旱持续时间、降水量、降水持续时间、还有空气湿度、水汽压等)^[1,2,4,5,7-9,16,17],这些要素都与沙尘暴事件直接相关;而云量、日照时数、气温及地温等则会通过创造或破坏热力条件来影响沙尘天气的发生与强度^[1,2,7,19]。此外,沙尘暴的发生会直接导致某些气象要素的改变,如后期降水的增多和日照时数的减少。为了尽可能全面、统一地表征沙尘暴发生的气象条件,鉴于一些要素与沙尘暴间的主动和被动关系很难截然分清,本文在选取要素时只考虑数据在统计意义上的有效性,不考虑要素与沙尘暴间是主动还是被动关系^[1,18]。

2. 资料和方法

2.1. 资料选取

本文所选甘肃省60个测站(图1)1954~2005年间春季17个气象要素(包括气压P、最高气压HP、最低气压LP、风速WS、最大风速FWS、最大风速风向WD、气温T、最高气温HT、最低气温LT、水汽压VP、相对湿度RH、最小相对湿度SRH、20-8时降水量

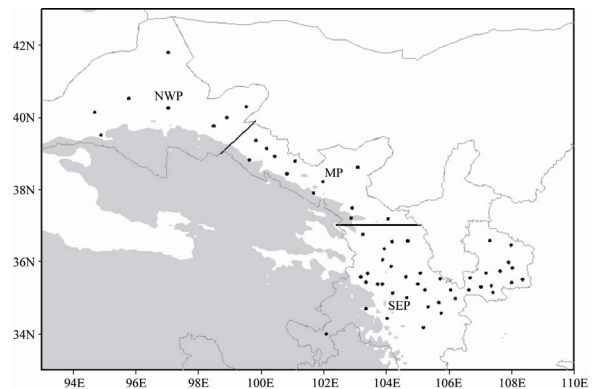


Figure 1. The selected 60 gauge stations' positions (the two lines divide Gansu Province into three regions: Northwest Gansu, Southeast Gansu and Middle Gansu). The shaded area is the Northeast corner of the Qinghai-Xizang Plateau
 图1. 所选60个测站的位置分布,图中直线将甘肃省分为西北、东南和中部三区。阴影部分为青藏高原东北角

R2008、8-20 时降水量 R0820、20-20 时降水量 R2020、蒸发量 E 和日照时数 SH)和沙尘暴的日值资料均由中国气象科学数据网提供。

所选资料具有以下特征: 1) 不同测站数据的起始和终止年份并不完全相同, 最早始于 1954 年, 最晚终于 2005 年, 数据跨越年份最短 27 年, 最长 52 年; 2) 沙尘暴数据在各站的起始和终止年份(或日子)间均无空记录, 但所有气象要素均存在或多或少的空记录, 且其缺测值在测站和年份(或日子)间的分布并不完全一致, 敦煌站(52418)在 1967 年的所有春季日均有 7 个缺测要素, 是缺测要素最多的测站和年份(日子); 3) 以下即将各测站沙尘暴数据不为空记录的春季日称为该测站的沙尘数据有效日; 并将任一测站任一要素(包括沙尘暴)在任一日子非空记录视为一个随机样本。由于各要素的记录中均存在以上所指出的不完整性, 同一测站的不同要素或不同测站的同一要素所具有的总样本数均不完全相同。为了使所有有效数据能够得到充分应用, 同时尽可能使文中相关结论在统计意义上既具有可靠性, 又在测站和要素间均具有可比性, 在选择数据时我们保证每个测站每个要素的总样本数均不少于某个阈值: 其中对风向而言, 各站总样本数的阈值选为 1000, 即各站用于统计分析的总样本数不少于 1000; 对降水而言, 各站总样本数的阈值选为 600, 对其它要素而言, 各站总样本数的的阈值均选为 1500, 很明显, 阈值越大, 说明对应要素的数据越完整。这样就使一些测站的个别要素会被剔除, 而且各站剔除的要素并不完全一致, 其中剔除要素最多(4 个)的测站有 10 个, 也即它们有 13 个有效要素, 剔除 2 个要素的有 17 个测站, 剔除 1 个要素的有 8 个站, 其余 26 个测站的 17 个要素全部有效; 4) 因剔除所致, 17 个要素中有 4 个要素的有效测站数小于 60(表 1); 5) 在一些要素或缺测或被剔除的情况下, 所有测站所有沙尘数据有效日中有效要素不少于 15 个的记录(站日)占 54%, 不少于 10 个的占 99.92%, 极个别站、日的有效要素在 3-9 个之间; 6) 就 1954~2005 年间的任一春季日而言, 沙尘暴数据不为空记录的测站总数就是该日的有效测站数。52 年共 4784 个春季日中, 有 21.15% 的春季日, 其有效测站为 60 个, 42.31% 的春季日的有效测站在 52~59 个之间, 还有 21.15% 的春季日, 其有效测站在 42~49 个之间; 有效测站不少于 35 个的春季

日共占 86.54%, 有效测站在 22~28 个之间的春季日占 5.77%, 其余 7.69% 的春季日的有效测站在 15~19 个之间。严格来讲, 缺测数据及其分布的不一致性会部分影响所得结论在不同测站和不同年份乃至日子间的可比性, 然而这种影响不足以歪曲本文的结论。

2.2. 沙尘暴发生可能性指数的建立方法

表征沙尘暴发生可能性的气象指数可由以下方法和步骤来建立:

1) 将各站各要素(以 X_n 表示, n 为要素序号)在所选时域内的所有日值样本由低(小)到高(大)分为 7 个等级, 使每个等级所含的组样本量尽量均等, 分别求出各个等级间转换的临界值。由于各站的地理和气候条件不同, 不同测站同一要素相同等级间的临界值并不相等, 甚至相差悬殊, 同一等级的平均值间也存在很大差别。由于各站降水量(包括 20-8 时、8-20 时以及 20-20 时的降水量)大于 0 的样本数远小于等于 0 的样本数, 故将降水量只分为无降水和有降水两个等级。风向不能以大小而论, 只能以各站出现的记录种数来划分, 为保证相关结论在统计意义上的真实性和可比性, 将各站样本数少于 100 的风向类型剔除, 各站所剩种数即为该站风向的等级(或类型)数, 以下将之记为 w_i 。

2) 利用历史资料分别计算各站要素 X_n 处于不同等级时沙尘暴发生的频率:

$$p_{i,k}(X_n) = \frac{S_{i,k}(X_n)}{M_{i,k}(X_n)} \times 100\%, \quad k = 1, 2, \dots, kk, \quad (1)$$

其中, i 表示站号, kk 分别为 X_n 的等级序号和等级数, 若 X_n 为降水量, $kk = 2$, 若为风向, $kk = w_i$; $M_{i,k}(X_n)$ 、 $S_{i,k}(X_n)$ 分别表示第 i 站 X_n 处于 k 等时的组样本数和该站该等中 X_n 与沙尘暴对应的样本数, $p_{i,k}(X_n)$ 即为第 i 站 X_n 处于 k 等时沙尘暴发生的频率。由于选择资料时确保各站各要素的样本数不少于某一阈值, 结果使得各站各要素各等级的样本数均不少于 100, 即 $\min_{1 \leq i \leq i_z, 1 \leq n \leq i_x, 1 \leq k \leq kk} (M_{i,k}(X_n)) = 100$, 其中 i_z 、 i_x 分别表示 X_n 的有效测站数和第 i 站的有效要素个数。各要素大量的样本完全能够保证 $p_{i,k}(X_n)$ 在统计意义上的真实性。

3) 若第 i 站第 j 日要素 X_n 所居等级号为 m , 则该站该日与要素 X_n 相联系的沙尘暴发生的可能性即为

$P_{i,j}(X_n) = p_{i,m}(X_n)$ (注意字母的大小写)。

4) 不同要素影响沙尘暴的强度不同, 也就是说, 对同样或相似的变化幅度而言, 不同要素的改变引发沙尘暴发生可能性的变化幅度定会有所不同, 甚至相差悬殊。某一要素处于不同大小等级时沙尘暴发生的频率会有很大差异, 故我们可将要素处于不同等级时沙尘暴发生频率的最大值和最小值之差定义为该要素对沙尘暴的影响强度^[1,18]:

$$F_i(X_n) = \max_{1 \leq k \leq k_k} (p_{i,k}(X_n)) - \min_{1 \leq k \leq k_k} (p_{i,k}(X_n)) \quad (2)$$

很明显, 以上定义的影响方式和影响强度不仅在要素间具有可比性, 在测站间也具有可比性。

5) 以要素的影响强度为权重, 对各站各日与所有有效要素相联系的沙尘暴发生频率进行权重平均, 结果即为我们所要建立的可表征相应站日沙尘暴发生可能性的气象指数:

$$\begin{aligned} PI_{i,j} &= \frac{\sum_{n=1}^{L(i,j)} F_i(X_n) P_{i,j}(X_n)}{\sum_{n=1}^{L(i,j)} F_i(X_n)} \\ &= \frac{\sum_{n=1}^{L(i,j)} F_i(X_n) P_{i,l(i,j,X_n)}(X_n)}{\sum_{n=1}^{L(i,j)} F_i(X_n)} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $L(i,j)$ 表示第 i 站第 j 日的有效要素个数, $l(i,j,X_n)$ 表示 X_n 在第 i 站第 j 日所居的等级序号。以下将 PI 简称为可能性指数。

2.3. 有无沙尘暴判据的建立方法

基于可能性指数, 可建立判断某日有无沙尘暴事件的具体判据。该判据以是否密集在参考标准(比如有沙尘暴和无沙尘暴)附近为主要依据。步骤如下:

1) 分别求出各站可能性指数在有、无沙尘暴日的样本平均值 $PIA1_i$ 和 $PIA0_i$:

$$PIA1_i = \left(\frac{\sum_{j_1=1}^{J_1(i)} PI_{i,j_1}}{J_1(i)} \right) \quad (4)$$

$$PIA0_i = \left(\frac{\sum_{j_0=1}^{J_0(i)} PI_{i,j_0}}{J_0(i)} \right) \quad (5)$$

其中, j_1 和 j_0 分别表示有、无沙尘暴的样本序号, $J_1(i)$ 和 $J_0(i)$ 分别表示第 i 站有、无沙尘暴的样本总数。

2) 分别求出各站可能性指数在所有有、无沙尘暴日的样本标准差 $SDPII_i$ 和 $SDPIO_i$:

$$SDPII_i = \sqrt{\frac{\sum_{j_1=1}^{J_1(i)} (PI_{i,j_1} - PIA1_i)^2}{J_1(i)}}$$

$$SDPIO_i = \sqrt{\frac{\sum_{j_0=1}^{J_0(i)} (PI_{i,j_0} - PIA0_i)^2}{J_0(i)}} \quad (6)$$

3) 最后给出某站某日沙尘暴能否发生的具体判据:

若 $PIA0_i + SDPIO_i < PIA1_i - SDPII_i$,

$$nf_{i,j} = \begin{cases} 1, & PI_{i,j} \geq (PIA1_i - SDPII_i) \\ 0, & PI_{i,j} \leq (PIA0_i + SDPIO_i) \\ 1/2, & (PIA0_i + SDPIO_i) < PI_{i,j} < (PIA1_i - SDPII_i) \end{cases} \quad (7)$$

若 $PIA0_i + SDPIO_i \geq PIA1_i - SDPII_i$,

$$nf_{i,j} = \begin{cases} 1, & PI_{i,j} \geq (PIA1_i - SDPII_i + PIA0_i + SDPIO_i)/2 \\ 0, & PI_{i,j} < (PIA1_i - SDPII_i + PIA0_i + SDPIO_i)/2 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $nf_{i,j} = 1$ 表示第 i 站第 j 日有沙尘暴, $nf_{i,j} = 0$ 表示没有, $nf_{i,j} = 1/2$ 表示无法确定。应用此判据, 可先对所选测站在所选有效日子的沙尘暴发生情况进行判断, 将结果与历史资料相比, 可断定所给判据的准确性。为了揭示该判据对近年来沙尘暴的判断能力, 我们应将它应用于 2005 年以后(即所选时域以外)的气象资料, 但因撰写此文时还未获得这些资料, 故未能对此进行分析。由于大量历史资料所体现出的统计特性至少对向外延续的少量样本(年份)具有足够的稳定性或适用性, 因而我们有理由相信该判据对近几年的沙尘暴具有同样的判断能力。

3. 沙尘暴发生可能性指数的合理性及适用性

3.1. 可能性指数在有无沙尘暴日的平均值之差

首先求出可能性指数在有、无沙尘暴日的平均值之差 $DPIA_i$:

$$DPIA_i = PIA1_i - PIA0_i \quad (9)$$

只有 $DPIA_i > 0$, 即可能性指数在沙尘暴日大于无沙尘暴日, 才说明这一指数足够合理, 且 $DPIA_i$ 越大, 说明 $PI_{i,j}$ 越能够合理、有效地表征第 i 站第 j 日沙尘暴发生的可能性。

图 2 即为全省的 $DPIA_i$ 分布情况。 $DPIA_i$ 在全省各站均为正值, 最小值(0.22%)位于临洮(52986, 35.37°N, 103.87°E), 其多年平均春季沙尘暴频次为 0.3, 位居全省倒数第二, 最大值(11.36%)位于民勤(52681, 38.63°N, 103.08°E), 其沙尘暴频次为 12.1, 居全省最大。

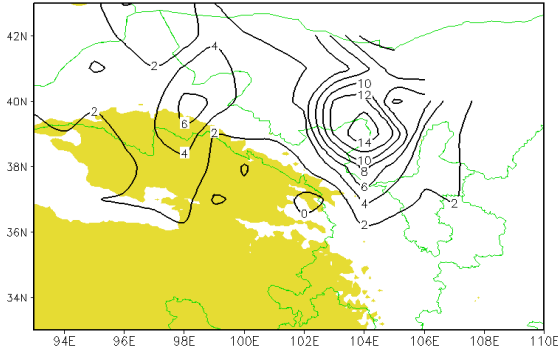


Figure 2. The difference (%) of the mean dust storm happening probability descriptor between the spring dust storm and non-dust storm days for each gauge station in Gansu Province of China. The shaded area is the Qinghai-Xizang Plateau's North-East corner
图 2. 甘肃省各测站沙尘暴发生可能性指数在有、无沙尘暴日的平均值之差(%)。阴影部分是青藏高原东北角

DPIA_i与 DSF_{i,N}场间的相似系数高达 0.97。DPIA_i 在全省的平均值为 1.7%，标准差为 2.04%，DPIA_i 在测站间的这种较大差异主要源于沙尘暴频次的区域性差异较为显著。

与各要素相联系的沙尘暴发生概率在有、无沙尘暴日的平均值之差在各有效测站也均为正值(表 1)，其中最大和平均风速的全省平均差分别高达 10.32%和 4.6%，成为 17 个要素中之最大。可见，这些要素与沙尘暴密切相关，这与普遍认可的风速是沙尘暴的发生主因的认识是吻合的，用与其相联系的沙尘暴发生频率来表征沙尘暴发生的可能性是合理、可行的。

3.2. 有无沙尘暴判据的准确性

根据以上所给的有无沙尘暴判据对所选各测站在所选各春季日有无沙尘暴发生分别作出判断。将各站判断结果与实际相符的日数与所有有效日数的比值称为判据在该站的准确率 *Fri*。将 1954 年 3 月 1 日~2005 年 5 月 31 日间的每个春季日判断结果与实际相符的测站数和该日有效测站数的比值称为判据在该日的准确

范围 *Frj*。

3.2.1. 判定单站沙尘暴能否发生的准确率

图 3(a)即为准确率 *Fri* 的全省分布情况。大致而言，甘肃省西北大部、中北部以及甘南部分区域的准确率要高于青藏高原东北边缘地区；最小准确率为 62%，位于甘南的正宁(53935, 35.5°N, 108.35°E)，最大准确率为 87%，位于甘南北部的皋兰(52884, 36.35°N, 103.93°E)。全省 60 个测站中样本数最小为 2484，最大为 4784，平均样本数为 3924，判断准确的样本数最小为 1945 个，最大为 4072 个，全省平均为 3181 个。所有测站的平均准确率为 81%，标准差为 4%，60 个测站中有 43 个的准确率达到 80% 以上，有 58 个的准确率达到 73% 以上，可见所给判据对全省各站的沙尘暴事件均有很好的判断能力。

3.2.2. 判定某日沙尘暴能否发生的准确范围

所有 4784 个春季日中有效测站最少为 15 个，最多为 60 个，平均为 49 个；判断准确的测站最少为 4 个，最多为 60 个，平均为 40 个；准确范围最小为 23%，最大为 100%，其平均值为 81%，标准差为 14%；准确范围在 70% 以上的日子占 80%，在 80% 以上的日子占 62%，有 34% 以上的日子准确范围在 90% 以上，5% 以上的日子完全准确，这些都表明所给判据能够很好地应用于判断某日甘肃省沙尘暴的发生范围(如图 3(b))。

3.3. 可能性指数对沙尘暴频次的表征能力

若指数 $PI_{i,j}$ 能够合理表征第 *i* 站第 *j* 日沙尘暴发生的可能性，那么 $PI_{i,j}$ 在某年(以 *N* 表示)所有春季日所有沙尘暴日的累加值对沙尘暴的频次有一定的指示意义：

$$API_{i,N} = \sum_{j=1}^{JJ_1(i,N)} PI_{i,j} \quad (11)$$

其中， $JJ_1(N)$ 表示第 *N* 年春季沙尘暴日的总样本数。

Table 1. The number of available gauge stations for each meteorological factor, and the minimum, maximum and average differences of the dust storm happening probability associated to each factor between the dust storm and non-dust storm days in spring, and the corresponding standard deviation of the difference for all the available stations

表 1. 各气象要素的有效测站数、以及与各要素相联系的沙尘暴发生频率在有、无沙尘暴日的平均值之差在所有有效测站的最值、平均值及标准差

X_n	P	HP	LP	WS	FWS	RH	VP	SRH	R2008	R0820	R2020	E	SH	T	HT	LT	WD
有效测站数	60	48	48	60	27	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	33
最小值(%)	0.07	0.01	0.11	0.18	0.54	0.1	0.1	0.08	0.0001	0	0	0.13	0.15	0.04	0.07	0.06	0.25
最大值(%)	1.36	1.34	2.92	25.66	38.59	1.87	1.76	2.25	0.34	0.9	0.88	3.27	9.35	0.68	0.72	1.2	9.75
平均值(%)	0.32	0.44	0.97	4.6	10.32	0.66	0.47	0.64	0.05	0.12	0.12	0.87	1.46	0.29	0.31	0.29	1.99
标准差(%)	0.23	0.32	0.68	5.47	9.26	0.43	0.31	0.51	0.06	0.2	0.21	0.73	2.05	0.15	0.16	0.2	1.96

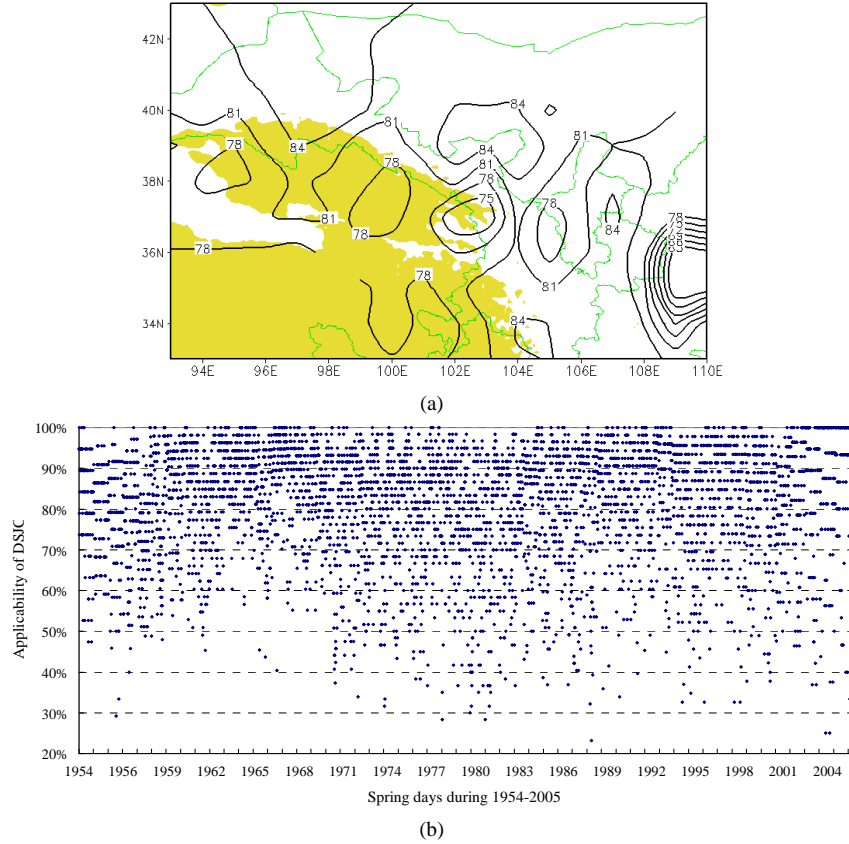


Figure 3. (a) Efficiency of the judging criterion for spring daily dust storm occurrence based upon the dust storm happening probability descriptor for each gauge station in Gansu Province of China. The shaded area is the Qinghai-Xizang Plateau's North-East corner; (b) The fraction of the whole province with correct judgment by this criterion for each spring day during the period of March 1, 1954 to May 31, 2005
图 3. (a) 基于可能性指数的有无沙尘暴判据在甘肃省各测站的准确率 (阴影部分是青藏高原东北角); (b) 判据在 1954 年 3 月 1 日~2005 年 5 月 31 日间各春季日的准确范围

只有 $API1_{i,N}$ 和 $DSF_{i,N}$ 二空间场间的相似系数足够大, 才能说明 $API1_{i,N}$ 能够有效地表征第 N 年春季沙尘暴频次的空间变化特征, 也才能够更进一步证实 $PI_{i,j}$ 对沙尘暴发生的可能性有足够强的表征能力。下面即分别对 $PI_{i,j}$ 表征沙尘暴频次年际和空间变化特征的能力分别进行讨论。

3.3.1. 可能性指数表征沙尘暴频次年际变化的能力

图 4 给出 $API1_{i,N}$ 与 $DSF_{i,N}$ 序列间的相关系数。总体而言, $API1_{i,N}$ 与 $DSF_{i,N}$ 间的相关系数在所有测站都很大, 最小值为 0.7, 最大值为 1, 全省平均值为 0.96, 标准差仅为 0.06, 说明 $API1_{i,N}$ 对各测站沙尘暴频次的年际变化都有很好的表征能力。

3.3.2. 可能性指数表征沙尘暴频次空间变化的能力

图 5 给出不同年份 $API1_{i,N}$ 与 $DSF_{i,N}$ 的空间场间的相似系数。很明显, $API1_{i,N}$ 与 $DSF_{i,N}$ 间的相关系数在所有年份都保持在 0.55 以上, 其多年平均值为 0.89,

53 年中有 22 年的相似系数超过 0.9, 除 2 年外所有年

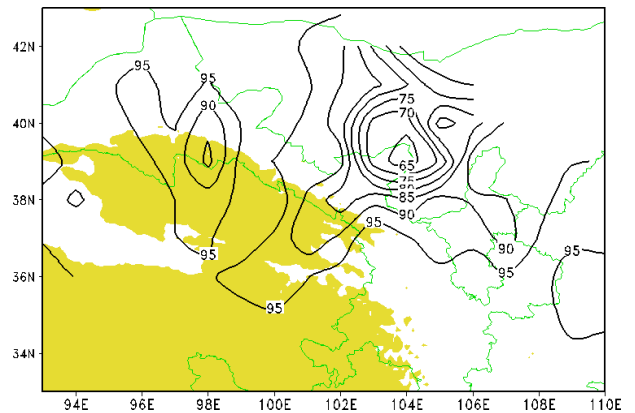


Figure 4. The correlation coefficient distribution between the spring dust storm frequency and the accumulated dust storm happening probability descriptor for all spring dust storm days over Gansu Province of China. The shaded area is the Qinghai-Xizang Plateau's North-East corner
图 4. 甘肃省各站沙尘暴可能性指数在春季所有沙尘暴日的累加值与实际沙尘暴频次年际变化序列间的相关系数 (阴影部分是青藏高原东北角。)

份的相似系数均超过 0.8，说明 $API_{i,N}$ 对实际沙尘暴频次的空间变化确有相当好的表征能力。

3.4. 不同要素与沙尘暴关联大小的量化比较

不同要素在某地(站)的时间变化幅度及对该地(站)沙尘暴的影响强度不同,因而其对沙尘暴事件的贡献大小也各不相同,沙尘暴事件对要素造成的影响亦然。我们可用各站沙尘暴日与各要素相联系的平均沙尘暴发生概率来表征相应要素与相应测站沙尘暴的关联程度:

$$C_i(X_n) = \sum_{j=1}^{J_1(i)} P_{i,j}(X_n) / J_1(i) \quad (12)$$

$C_i(X_n)$ 越大,说明要素 X_n 的关联越大。表 2 列出 $C_i(X_n)$ 在所有有效测站的最值、平均值及标准差。对任一要素而言, $C_i(X_n)$ 的最大值比最小值均大 2 个量级,其标准差与平均值均相当,说明各要素对沙尘暴的贡献在不同测站间相差悬殊。

就全省平均而言,17 个要素中与沙尘暴关联最大的前 9 个要素依次为最大风速、风速、最大风速风向、日照时数、蒸发量、相对湿度、最小相对湿度、最低气压以及水汽压,其贡献分别为 12.54%、6.86%、4.43%、3.92%、3.41%、3.2%、3.18%、3.08%和 3.01%,这 9 个要素对沙尘暴的影响强度也居 17 个要素中之最大。表 3 给出 $F_i(X_n)$ 和 $C_i(X_n)$ 在全省平均值的大小排序,二者的排序基本一致,表明要素与沙尘暴的关联程度越大,其对沙尘暴事件的影响强度通常也越大。

表 4 列出 $C_i(X_n)$ 在甘肃省西北、中部和南部(即甘南)三个区域的平均值。除最大风速风向外,其余要素与沙尘暴的平均关联程度及平均可能性指数都是在西

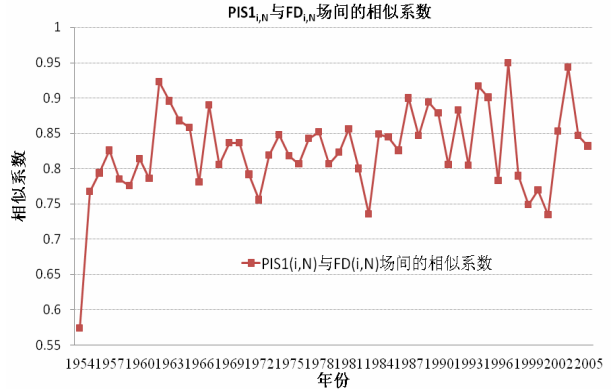


Figure 5. The yearly variation of the similarity coefficients between the spatial distributions of the spring dust storm frequency and the accumulated dust storm happening probability descriptors for all spring dust storm days over Gansu Province of China
图 5. 甘肃省沙尘暴可能性指数在春季所有沙尘暴日的累加值 $API_{i,N}$ 与实际沙尘暴频次 $DSF_{i,N}$ 空间场间相似系数的年际变化

北最大,中部次之,甘南最小,这可能与沙尘暴频次在西北最大、在甘南最小有直接关系。各要素关联程度的相对标准差总是在西北明显最小,说明它们与沙尘暴的关联程度在西北所有测站均比较大,而在其余两区的不同测站间却存在较大的差异。平均而言,与甘肃省西北部沙尘暴关联程度最大的 8 个要素依次为最大风速、风速、日照时数、蒸发量、相对湿度、最高气温、水汽压和最小相对湿度;与中部区沙尘暴关联程度最大的依次为最大风速、风速、日照时数、最大风速风向、蒸发量、最高气温、最低气温和气温;与甘南区沙尘暴关联程度最大的则为最大风速、风速、最大风速风向、最小相对湿度、相对湿度、蒸发量、水汽压和日照时数(表 4)。各区域所有要素与沙尘暴的平均关联程度及其对后者的平均影响强度的大小排序

Table 2. The minimum, maximum and average of the mean dust storm happening probability associated to each meteorological factor and the mean probability index on the spring dust storm day, and their corresponding standard deviations for all the available gauge stations
表 2. 沙尘暴日与各要素相联系的平均沙尘暴发生频率(即各要素与沙尘暴的关联程度)及平均可能性指数在所有有效测站的最值、平均值以及标准差

X_n	P	HP	LP	WS	FWS	RH	VP	SRH	R2008	R0820	R2020	E	SH	T	HT	LT	WD	PIA1
最小值(%)	0.24	0.51	0.34	0.36	0.79	0.51	0.39	0.5	0.2	0.23	0.16	0.3	0.38	0.39	0.26	0.43	0.39	0.38
最大值(%)	13.7	12.18	14.22	35.34	45.82	13.5	13.27	13.	13.25	13.48	13.58	16.	21.28	13.49	13.55	13.72	21.44	20.8
平均值(%)	2.66	2.58	3.08	6.86	12.54	3.2	3.01	3.1	2.61	2.68	2.68	3.4	3.92	2.84	2.86	2.84	4.43	3.76
标准差(%)	2.69	2.22	2.73	7.53	10.91	2.68	2.63	2.6	2.7	2.77	2.79	3.2	4.47	2.73	2.75	2.75	4.22	3.96

Table 3. The strong-weak (large-small) orders of the involved 17 meteorological factors according to their averaged associations to the dust storm event and their averaged impacting significances on the spring dust storm over Gansu, China
表 3. 17 个要素对甘肃省沙尘暴的平均关联程度和平均影响强度(由强到弱或由大到小)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
MC(X_n)	FWS	WS	WD	SH	E	RH	SRH	LP	VP	HT	T	LT	R0820	R2020	P	R2008	HP
MF(X_n)	FWS	WS	WD	SH	E	LP	RH	SRH	VP	LT	HT	HP	T	P	R0820	R2020	R2008

Table 4. The averages (A) and standard deviations (D) of the mean dust storm happening probability associated to each meteorological factor and the mean probability descriptor on the spring dust storm day for all the available gauge stations (numbered by m) in Northwest, Middle and South Gansu of China

表 4. 沙尘暴日与各要素相联系的平均沙尘暴发生频率(即各要素与沙尘暴的关联程度)以及平均可能性指数在甘肃省西北、中部和南部三个区域所有有效测站(m 个)的平均值(A)和标准差(D)

X_n		P	HP	LP	WS	FWS	RH	VP	SRH	R2008	R0820	R2020	E	SH	T	HT	LT	WD	PIA1
西北部	m	8	8	8	8	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	A	5.52	4.23	5.13	15.81	19.52	5.91	5.72	5.70	5.40	5.53	5.51	7.27	9.17	5.68	5.74	5.66	4.77	7.74
	D/A	0.46	0.45	0.46	0.55	0.26	0.51	0.48	0.52	0.52	0.52	0.53	0.51	0.54	0.50	0.50	0.49	0.67	0.53
中部	m	12	12	12	12	8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12
	A	4.91	3.67	4.81	12.07	18.44	5.09	4.97	5.02	4.82	5.06	5.05	5.50	7.60	5.10	5.14	5.13	6.15	6.63
	D/A	0.75	0.86	0.73	0.81	0.80	0.71	0.70	0.72	0.74	0.72	0.73	0.77	0.75	0.69	0.70	0.71	1.03	0.86
东南部	m	40	28	28	40	13	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	15	40
	A	1.42	1.64	1.76	3.51	5.69	2.09	1.88	2.13	1.39	1.39	1.40	2.02	1.79	1.59	1.60	1.59	3.09	2.10
	D/A	0.77	0.69	0.82	0.84	0.80	0.62	0.69	0.62	0.84	0.84	0.83	0.69	0.82	0.77	0.75	0.75	0.78	0.80

基本一致,进一步证实了要素与沙尘暴的关联程度在某种意义上决定着其对沙尘暴的影响强度;不同要素与沙尘暴的关联程度及对后者的影响强度排序在各区域间既有相同的一面,又有不同的一面,笔者认为,相同的一面由要素本身在天气系统中的固有作用所决定,而不同的一面则应归因于不同区域的地理、生态和气候环境相差悬殊。

3.5. 其它要素对沙尘暴的可能影响

如前所述,除本文所选的 17 个要素外,影响沙尘暴的要素还有很多,所选要素不可能完全表征沙尘暴发生的气象条件,为此,有必要分析其它要素对沙尘暴的影响是大是小。下面引入参数 $PIO_{i,j}$,即某站某日与所选要素相联系的不发生沙尘暴的可能性:

$$PIO_{i,j} = \frac{\sum_{n=1}^{L(i,j)} F_i(X_n)(1 - P_{i,j}(X_n))}{\sum_{n=1}^{L(i,j)} F_i(X_n)} \quad (12)$$

$$= \frac{\sum_{n=1}^{L(i,j)} F_i(X_n)(1 - P_{i,1(i,j,X_n)}(X_n))}{\sum_{n=1}^{L(i,j)} F_i(X_n)}$$

根据公式的物理意义可将之视为要素对沙尘暴的反关联。将 $PIO_{i,j}$ 在沙尘暴日的样本平均值记为 $PIOA1_i$,而 $PIOA1_i$ 与 $PIA1_i$ 的和即可近似看作所选要素对沙尘暴的总影响,这样就可把 $1 - (PIOA1_i + PIA1_i)$ 视为其它要素对沙尘暴的可能影响,记为 PIO_i :

$$PIO_{i,j} = 1 - (PIOA1_i + PIA1_i) \quad (13)$$

图 6 给出 PIO_i 在甘肃省的分布情况。 PIO_i 在甘肃中西部较大,在甘南地区较小,说明所选要素还不足以全面表征甘肃省沙尘暴发生的气象条件,特别是对中西部而言这种不足更为明显,获得更全面的气象资料是更全面、客观地表征该地区沙尘暴发生气象条件的

关键。 PIO_i 的最小值 0.83% 位于陇西(56092, 35°N, 104.65°E),最大值 29.96% 位于武威(52679, 37.92°N, 101.67°E),各站均值为 12.98%,标准差为 7.04%,60 个测站中有 33 个 $PIO_i < 15\%$,说明就全省而言, PIO_i 普遍较小;表 5 列出所选要素在全省的多年平均场与沙尘暴频次场间的相似系数以及要素与频次数列间相关程度的全省平均值,其中有 8 个要素的相似系数不小于 0.7,还有 4 个要素的在 0.5 以上,9 个要素的平均相关程度在 0.2 以上,进一步说明所选要素确实是影响甘肃省沙尘暴的关键因子。

4. 小结

本文利用甘肃省 60 个测站 1954~2005 年间春季 17 个气象要素处于不同大小等级时沙尘暴发生的频率,建立了表征和判断某日沙尘暴发生可能性的气象指数,并据此给出判断某日沙尘暴能否发生的气象判据,为预报沙尘暴和填补历史资料提供了一条新途径。

通过对沙尘暴发生的频率和文中所建可能性指数进一步处理、计算和分析,结果发现:

- 1) 将要素处于不同大小等级时沙尘暴发生频率的最大值和最小值之差视为要素对沙尘暴的影响强度是有一定的科学意义和实用价值的;
- 2) 以要素的影响强度为权重,对各站各日与所有有效要素相联系的沙尘暴发生频率进行权重平均后,所得结果即可有效地表征相应站日沙尘暴发生的可能性;
- 3) 依据沙尘暴发生的可能性是否密集在参考标准附近,可建立判断某日有无沙尘暴事件的具体有效判据;
- 4) 所选 17 个要素是影响甘肃省沙尘暴的关键因子;

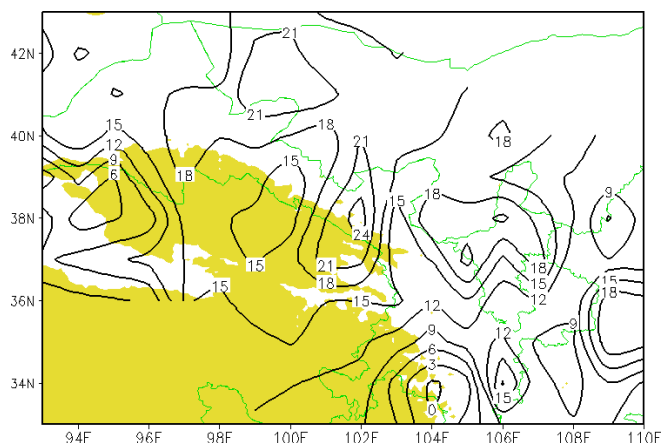


Figure 6. The other factors' contribution to the spring daily dust storm occurrence over Gansu Province of China. The shaded area is the Qinghai-Xizang Plateau's North-East corner

图 6. 甘肃省其它要素对沙尘暴事件的可能贡献 PIO_i (阴影部分是青藏高原东北角)

Table 5. The similarity coefficients $Sim(X_n)$ between the average distributions of each meteorological factor and the dust storm frequency and the absolute correlation coefficients $MAR(X_n)$ between the factor and the frequency averaged over Gansu Province of China

表 5. 甘肃省多年平均气象要素与沙尘暴频次场间的相似系数 $Sim(X_n)$ 以及要素与频次序列间相关程度的全省平均值 $MAR(X_n)$

X_n	P	HP	LP	WS	FWS	RH	VP	SRH	R2008	R0820	R2020	E	SH	T	HT	LT
$Sim(X_n)$	0.70	0.70	0.70	0.70	-0.17	0.57	0.58	0.51	0.34	0.37	0.35	0.81	0.75	0.72	0.73	0.51
$MAR(X_n)$	0.16	0.28	0.27	0.35	0.43	0.2	0.23	0.13	0.12	0.11	0.14	0.25	0.15	0.2	0.17	0.21

5) 所选 17 个要素中, 与沙尘暴关联最大、且对沙尘暴的影响强度也达到最大的前 9 个要素为最大风速、风速、最大风速风向、日照时数、蒸发量、相对湿度、最小相对湿度、最低气压以及水汽压;

6) 一般而言, 要素与沙尘暴的关联程度越大, 其对沙尘暴事件的影响强度也越大;

7) 另外, 各要素与沙尘暴的关联程度及对后者的影响强度会随地域的不同而发生很大的变化。

8) 不同要素与沙尘暴的关联程度及对后者的影响强度排序在各区域间既有相同的一面, 又有不同的一面, 笔者认为, 相同的一面由要素本身在地气系统中的固有作用所决定, 而不同的一面则应归因于不同区域的地理、生态和气候环境相差悬殊, 这一点值得深究。

5. 致谢

本工作得到国家重点基础研究发展计划(973 计划, 课题编号: 2009CB421402)、半干旱气候变化教育部重点实验室开放基金(兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金, 项目编号: 223-860011)及自然科学基金面上项目(课题号: 40975007)的共同资助, 在此深表谢意! 同时也真诚感谢几位匿名编辑的有益建议。

参考文献 (References)

- [1] 李万元, 吕世华, 董治宝, 王式功, 田文寿, 余晔, 沈志宝, 陈玉春, 郭勇涛. 中国北方春季沙尘暴频次的多要素线性拟合[J]. 高原气象, 2010, 29(5): 1302-1313.
- [2] F. Huang, Q. Gao. Climate controls on dust storm occurrence in Maowusu Desert, Inner Mongolia, North China. Journal of Environmental Sciences, 2001, 13(1): 14-21.
- [3] R. Ding, J. Li, S. Wang and F. Ren. Decadal change of the spring dust storm in northwest China and the associated atmospheric circulation. Geophysical Research Letters, 2005, 32: Article ID L02808.
- [4] H. S. Kim, K. Kai. Recent dust outbreaks in the taklimakan desert and their relation to surface wind and land surface condition. Scientific Online Letters on the Atmosphere, 2007, 3: 69-72.
- [5] X. Liu, Z. Y. Yin, X. Zhang and X. Yang. Analyses of the spring dust storm frequency of northern China in relation to antecedent and concurrent wind, precipitation, vegetation, and soil moisture conditions. Journal of the Geophysical Research, 2004, 109: D16210-D16225.
- [6] Y. Shao. Physics and modeling of wind erosion. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001: 145-222.
- [7] T. Yamamoto, M. Yoshino and J. Suzuki. The relationship between occurrence of dust events and synoptic climatological condition in East Asia, 1999-2003. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2007, 85: 81-99.
- [8] W. H. Qian, L. S. Quan and S. Y. Shi. Variations of the dust storm in China and its climatic control. Journal of Climate, 2002, 15(10): 1216-1229.
- [9] C. M. Liu, Z. A. Qian, M. J. Wu, et al. A composite study of the synoptic differences between major and minor dust storm springs over China-Mongolia areas. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science, 2004, 15(5): 999-1018.
- [10] X. Wang, Z. Dong, J. Zhang, et al. Modern dust storms in China: An overview. Journal of Arid Environment, 2004, 58(4): 559-574.
- [11] S. Wang, J. Wang, Z. Zhou, et al. Regional characteristics of

- three kinds of dust storm events in China. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(3): 509-520.
- [12] Y. Q. Wang, X. Y. Zhang, S. L. Gong, C. H. Zhou, X. Q. Hu, H. L. Liu, T. Niu and Y. Q. Yang. Surface observation of sand and dust storm in East Asia and its application in CUACE/Dust. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2007, 7(3): 9115-9138.
- [13] X. Yang, K. Zhang, B. Jia, et al. Desertification assessment in China: An overview. *Journal of Arid Environment*, 2005, 63(2): 517-531.
- [14] X. K. Zou, P. M. Zhai. Relationship between vegetation coverage and spring dust storms over northern. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: D03104.
- [15] J. Xu. Sand-dust storms in and around the Ordos Plateau of China as influenced by land use change and desertification. *Catena*, 2006, 65(3): 279-284.
- [16] L. Natsagdorj, D. Jugder and Y. S. Chung. Analysis of dust storms observed in Mongolia during 1937-1999. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(9-10): 1401-1411.
- [17] M. Hayasaki, S. Sugata and H. L. Tanaka. 2006, Interannual variation of cold frontal activity in spring in Mongolia. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2006, 84(3): 463-475.
- [18] 李万元, 吕世华, 余晔, 董治宝, 沈志宝, 陈玉春. 气象要素影响沙尘暴的方式和强度研究[J]. *高原气象*, 2010, 29(4): 1058-1066.
- [19] 钟海玲, 李栋梁, 高荣. 青藏高原感热异常对沙尘暴影响的数值模拟[J]. *高原气象*, 2009, 28(2): 293-298.
- [20] 范俊红, 郭树军, 李宗涛. 河北省中南部一次沙尘暴的动力条件分析[J]. *高原气象*, 2009, 28(4): 795-802.
- [21] 冯军, 尚学军, 樊明. “4.28”青藏高原气旋产生沙尘暴、冰雹天气系统结构分析[J]. *高原气象*, 2009, 28(5): 1051-1057.
- [22] 曹贤洁, 张镭, 周碧等. 利用激光雷达观测兰州沙尘气溶胶辐射特性[J]. *高原气象*, 2009, 28(5): 1115-1120.
- [23] 岳平, 牛生杰, 张强. 民勤一次沙尘暴的观测分析[J]. *高原气象*, 2008, 27(2): 401-407.
- [24] 孙国武, 汤绪, 李江萍. 夏季风北边缘与沙尘暴的研究[J]. *高原气象*, 2008, 27(5): 1088-1093.