

报名号 1090

2008 年 第一届“数学中国杯”

数学建模网络挑战赛

承 诺 书

我们仔细阅读了首届“数学中国杯”数学建模网络挑战赛的竞赛规则。

我们完全明白，在竞赛开始后参赛队员不能以任何方式（包括电话、电子邮件、网上咨询等）与队外的任何人（包括指导教师）研究、讨论与赛题有关的问题。

我们知道，抄袭别人的成果是违反竞赛规则的，如果引用别人的成果或其他公开的资料（包括网上查到的资料），必须按照规定的参考文献的表述方式在正文引用处和参考文献中明确列出。

我们郑重承诺，严格遵守竞赛规则，以保证竞赛的公正、公平性。如有违反竞赛规则的行为，我们将受到严肃处理。

我们允许数学中国网站(WWW.madio.net)公布论文，以供网友之间学习交流，数学中国网站以非商业目的的论文交流不需要提前取得我们的同意。

我们的参赛报名号为：1090

参赛队员（签名）：

队员 1：

队员 2：

队员 3：

参赛队教练员（签名）：

参赛队伍组别：大学生组

报名号 1090

2008 年 第一届“数学中国杯”

数学建模网络挑战赛

编 号 专 用 页

参赛队伍的参赛号码：（请各个参赛队提前填写好）：

1090

竞赛统一编号（由竞赛组委会送至评委团前编号）：

竞赛评阅编号（由竞赛评委团评阅前进行编号）：

报名号 1090

2008 年 第一届“数学中国杯” 数学建模网络挑战赛

题 目 沙尘暴与各项气象指标的关系

关 键 词 沙尘暴 综合气象影响指数 遗传神经网络

回归模型 起沙机制 摩擦速度 风险预测

摘 要

本文通过数学建模的方法解决了西北地区沙尘暴与各气象指标的关系研究问题，并用遗传神经网络预报沙尘暴近期发生的可能性，最后尝试确定沙源地。

对问题一，我们关心每个观测站区的差别。首先，我们在定性分析气象指标与沙尘暴频率关系的基础上建立了综合气象影响指数模型，通过数据处理分别得到了各观测站区的综合气象影响指数 Q ，然后建立回归模型 $N = P_1Q + P_2$ ，并用 Matlab 拟合出了各观测站区线性回归模型系数，并给出了具体的根据观测数据估计出沙尘暴在某地区某段时间内发生的次数的流程图。

在问题二上，针对等级划分问题，我们考虑风强度和水平能见度两个直观量来对其等级进行划分，并建立了一个明细划分表格模型。

针对沙尘暴风险预测问题，我们建立风级、水平能见度同发生沙尘暴的危险性建立连续型随机变量模型，得到了发生沙尘暴的危险性预测值，并就何时发出警报进行了讨论。接着我们尝试用遗传神经网络对发生沙尘暴的风险性进行预测，并用遗传算法对原前向神经网络进行了优化，避免了神经网络初始的盲目性，减少了多次重复实验确定参数的不准确和时间的浪费。经检验，该网络模型能达到相对较高的精度。

问题三中，对于预测沙尘暴发生的风险问题，我们从沙尘暴的形成过程入手，查阅大量资料发现了临界摩擦速度、下垫面、沙粒的直径、植被覆盖率、土壤含水率、起沙量、沙尘的浓度等物理量之间的关系，进而根据本地能见度与沙尘浓度的关系预测出沙尘暴发生的风险。

对于沙源问题，我们通过合理的假设，根据沙尘运输的扩散、平流和沉降机理，发现沙尘在空气中运输过程的定量关系，通过在图上标定分析，进而得到我国的北方主要沙源为：南疆的塔克拉玛干沙漠及其周边地区、北疆的准噶尔盆地南沿、甘肃河西走廊和内蒙古干燥沙漠及青海柴达木盆地等地。其影响的主要地区是甘肃、宁夏、内蒙古、北京等大部分地区。

最后我们对几个主要模型进行了客观分析和讨论，得出了一些新的改进方向。并对我国沙尘暴问题进行深入了解，发现了一些治理对策。

参赛队号 1 0 9 0

所选题目 C 题

参赛密码 _____
(由组委会填写)

报名号 1090

目录

问题背景	2
1、沙尘暴天气成因	2
2、沙尘暴形成的物理机制	2
问题重述与分析	2
1、沙尘暴的发生的条件	2
2、各省的沙尘暴季节性分析	2
3、需考虑的气象因素分析	2
4、光照与沙尘暴关系的分析	3
5、沙尘暴与其他各个气象因素关系的定性分析	3
6、划分等级和预报的分析	6
模型假设	6
变量设置	7
模型建立与求解	7
问题一：	7
各气象因素对沙尘暴频率影响的定量分析	7
1、月份的气象因素的差异	8
2、地域差异对沙尘暴影响的不同	8
3、模型及计算结果的检验	9
问题二：	10
1、关于沙尘天气气象等级的划分	10
2、预测在近期内观测站所在地发生沙尘暴的风险	10
3、预报的神经网络模型方法	11
原理	12
模型建立	12
训练结果、测试及分析	13
问题三：	15
问题的进一步分析	15
模型基本假设	16
沙尘产生模块	16
1、临界摩擦速度	16
2、摩擦速度	17
3、判断临界条件	17
4、水平沙通量	17
5、垂直沙通量	18
沙尘运输模块	19
模型综述	20
1、起沙模型	20
2、沙尘运输模型	20
模型及结果分析	20
模型的改进	21
模型评价	22
模型的进一步讨论	23
1、对于问题一的气象因子模型的讨论	23
2、对于问题二的概率模型的讨论	23
3、对于风速与风蚀率关系的分析	23
问题扩展	24
1、我国沙尘暴加剧原因	24
2、未来变化趋势	24
3、对策建议	25
参考文献	25

问题背景

沙尘暴天气是我国西北地区和华北北部地区出现的强灾害性天气，可造成房屋倒塌、交通供电受阻或中断、火灾、人畜伤亡等，污染自然环境，破坏作物生长，给国民经济建设和人民生命财产安全造成严重的损失和极大的危害。

1、沙尘暴天气成因

有利的大风或强风的天气形势，有利的沙、尘源分布和有利的空气不稳定条件是沙尘暴或强沙尘暴形成的主要原因。强风是沙尘暴产生的动力，沙、尘源是沙尘暴物质基础，不稳定的热力条件是利于风力加大、强对流发展，从而夹带更多的沙尘，并卷扬得更高。除此之外，前期干旱少雨，天气变暖，气温回升，是沙尘暴形成的特殊的天气气候背景；地面冷锋前对流单体发展成云团或飑线是有利于沙尘暴发展并加强的中小尺度系统，有利于风速加大的地形条件即狭管作用，是沙尘暴形成的有利条件之一。

2、沙尘暴形成的物理机制

在极有利的大尺度环境、高空干冷急流和强垂直风速、风向切变及热力不稳定层结条件下，引起锋区附近中小尺度系统生成、发展，加剧了锋区前后的气压、温度梯度，形成了锋区前后的巨大压温梯度。在动量下传和梯度偏差风的共同作用下，使近地层风速陡升，掀起地表沙尘，形成沙尘暴或强沙尘暴天气。【1】

沙尘暴对环境和人们的生产、生活都造成了影响甚至危害，因此近年来人们加强了对沙尘暴预报的研究，但一直没能取得满意的结果。我们也见于这种情况，对沙尘暴的进行了简单的研究。

问题重述与分析

重述

沙尘暴是一种灾害性天气，近年来频繁发生，对环境和人们的生产、生活都造成了影响甚至危害。对沙尘暴的发生条件需要加以研究，以便人们进行有效的预测和预防。请为沙尘暴的发生建立数学模型，具体问题如下：

问题一：对沙尘暴的发生次数进行分析，建立相应的数学模型，使人们可以根据相关气象数据的监测结果，估计出沙尘暴在某地区某段时间内发生的次数。

问题二：评估沙尘天气气象等级，预测在近期内观测站所在地发生沙尘暴的风险，并在高风险时发出警报信息。

问题三：考虑到沙尘在空气中随风传输的过程和各个观测站点的空间位置，进一步深入前面的问题，完善气候因素对沙尘暴发生频率的影响模型，完善各地区对沙尘暴的短期预报机制，并估计中国境内引起沙尘暴的重要沙源地位置及其影响范围。

分析

1、沙尘暴的发生的条件

沙尘暴天气虽然是一个短期天气过程，但却是在特定的地理环境及气候条件下形成的特殊天气现象。沙尘暴的发生至少要具备3个基本条件：一是大风，这是形成沙尘暴天气的动力条件；二是地面丰富的沙尘源，这是形成沙尘暴天气的物质基础；三是不稳定的空气状况，这是重要的局地热力条件。

2、各省的沙尘暴季节性分析

综合对所给数据进行观察，我们可以初步得到内蒙古、新疆、青海、宁夏、甘肃、陕西六省沙尘暴季节变化特征，春季较频繁的是内蒙古，冬末春初较多的是青海，春夏较多的是新疆、甘肃、陕西、宁夏。

3、需考虑的气象因素分析

对于问题一，估计出沙尘暴在某地区某段时间内发生的次数，需综合考虑：月平均风速、大风发生次数、月平均气温、月降水量、月蒸发量、月相对湿度、月辐射值等气

候条件与沙尘暴的发生频率的关系。

4、光照与沙尘暴关系的分析

对于题目给的辐射值数据，我们查阅了相关资料【2】，发现它不是沙尘暴的成因。对于题目所给数据进行分析（见附录一），沙尘通过对太阳辐射的散射和吸收产生直接的气候效应，在沙尘暴过程中，总辐射、光的有效辐射以及净辐射都大幅度减少，且沙尘对可见光辐射和总辐射的衰减幅度一致。所以，我们在考虑综合气象因素时，不需把辐射作为沙尘暴的成因来考虑。

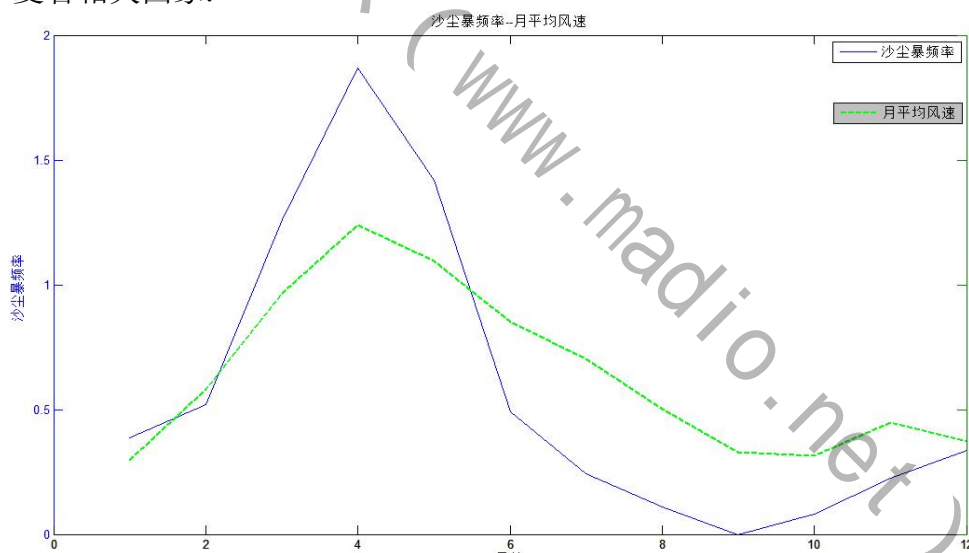
5、沙尘暴与其他各个气象因素关系的定性分析

沙尘天气是各个因素综合作用的结果，不可孤立建某一个因素与沙尘暴频率的定量关系，但我们可以根据关联图来定性的得到它们的关系。

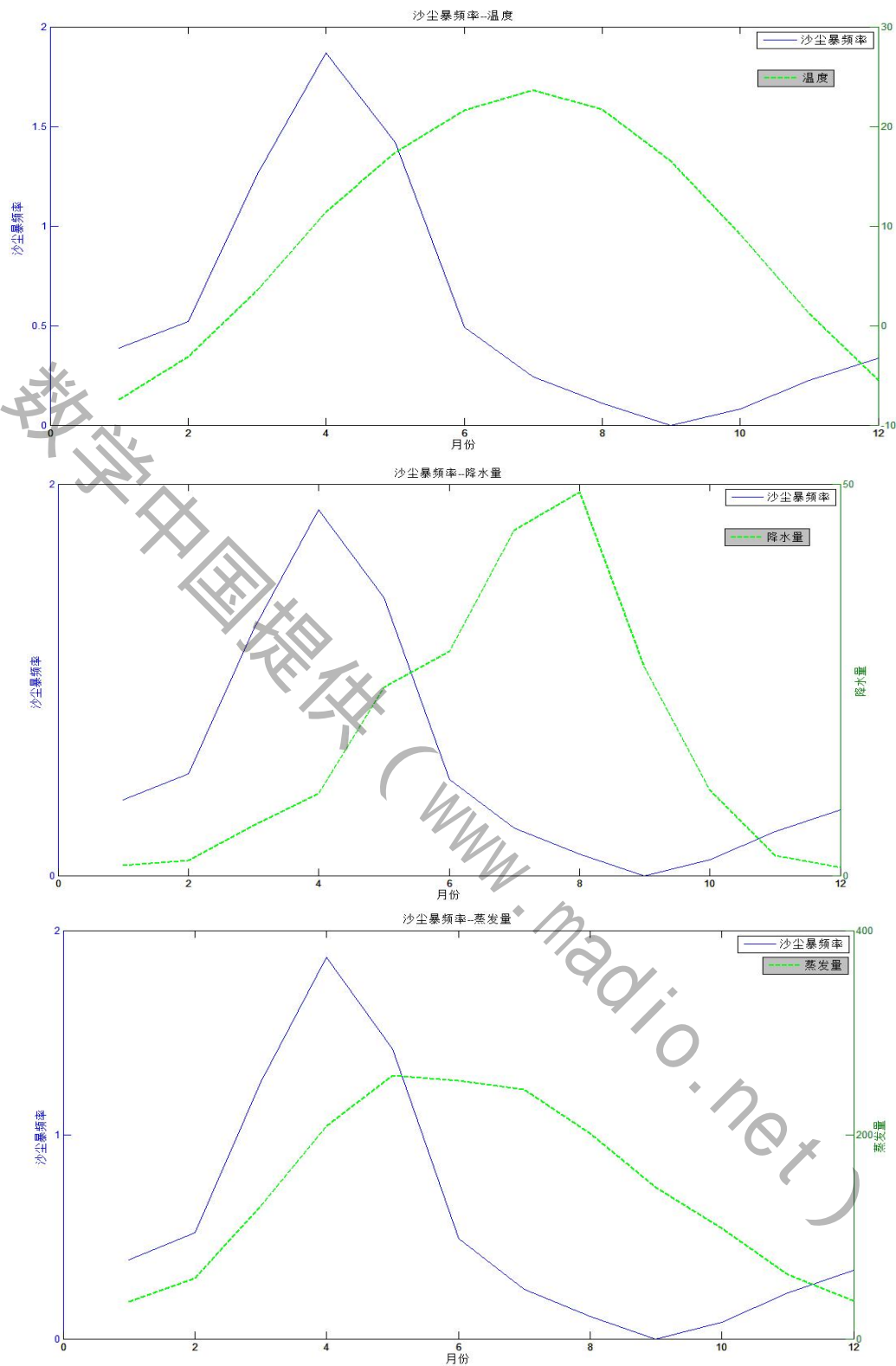
观察题目所给数据发现，61到81年期间，各地的沙尘暴发生概率相对于82到05年同期数据很小，而显然后25年沙尘暴发生概率总体呈上升趋势，这是与社会因素紧密相关的。改革开放前经济发展相对较慢，自然环境也基本没遭到多大的破坏；78年改革开放后，经济迅速发展的同时也带来了自然资源的极大消耗和环境的较为严重的破坏，并且这种速度长期以来一直在加快，特别是西北地区的沙化速度长期保持在大于治理的水平上，所以造成了这样的观测结果。我们在处理数据时，完全可以忽略掉前二十年的缓慢变化的数据，只分析后25年的观测数据。

鉴于观测站比较多，为了不失一般性，我们对各省的观测数据进行了初步处理，算出了各省平均观测数据(见附录一)，并以月份为横坐标、相应因素和沙尘暴频率为纵坐标，画出了对比曲线（详见附录二）

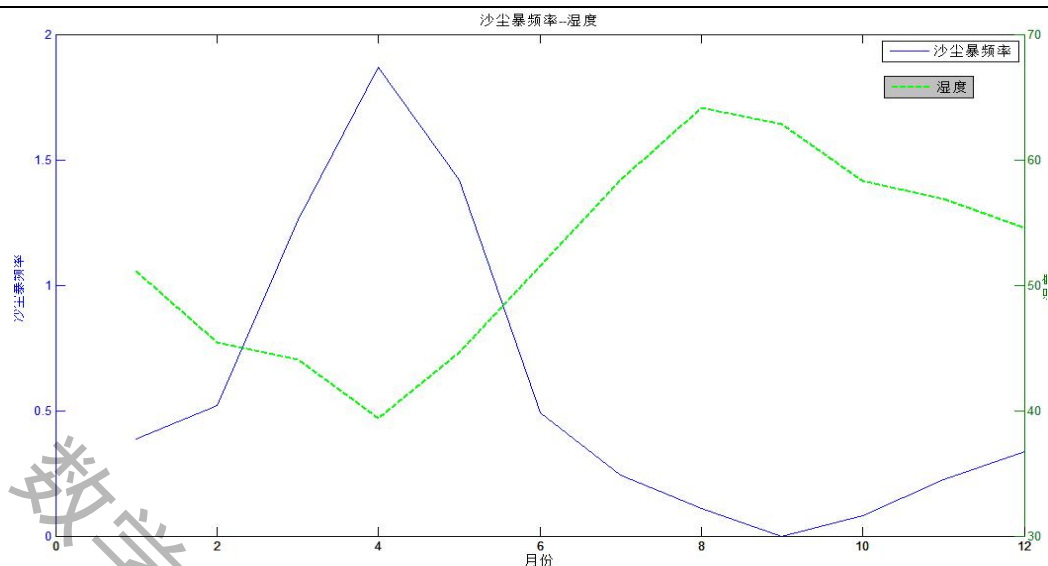
以下是宁夏省相关图象：



报名号 1090



报名号 1090



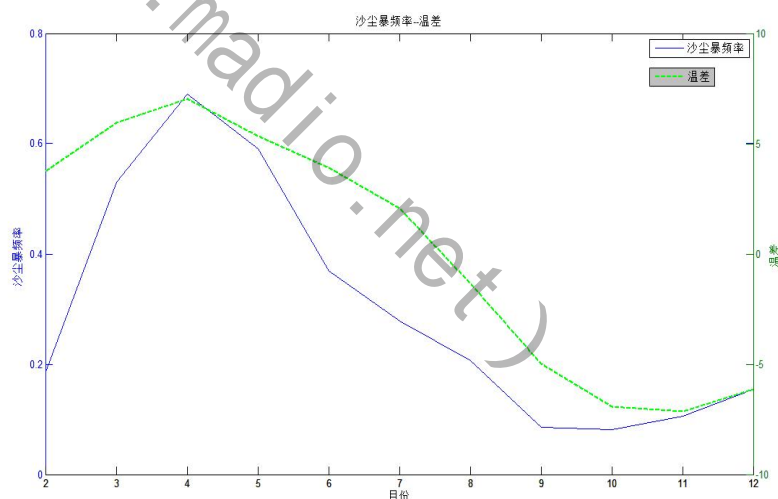
根据曲线我们可以发现：

1、沙尘暴的高频期与风速最大月相对应，沙尘暴发生的低频期基本与风速最小月相对应，即存在一定的正比关系。3~4月沙尘暴频率的增加与平均风速的增加是一致的，5月以后(包括5月)至整个夏季沙尘暴频率的下降速度大于月平均风速的下降速度。可以认为，5月以后由于雨水相应增多，下垫面植被覆盖率增高，地表湿润状况得到改善，沙尘暴发生频率的下降除受月平均风速下降的影响外，还在一定程度上受下垫面湿润状况的影响。

2、大风发生次数、月蒸发量与沙尘暴发生频率也存在相似的关系。这与沙尘暴的成因完全吻合。大风、强对流天气易于将沙尘带上高空，随风而飞，形成沙尘暴。

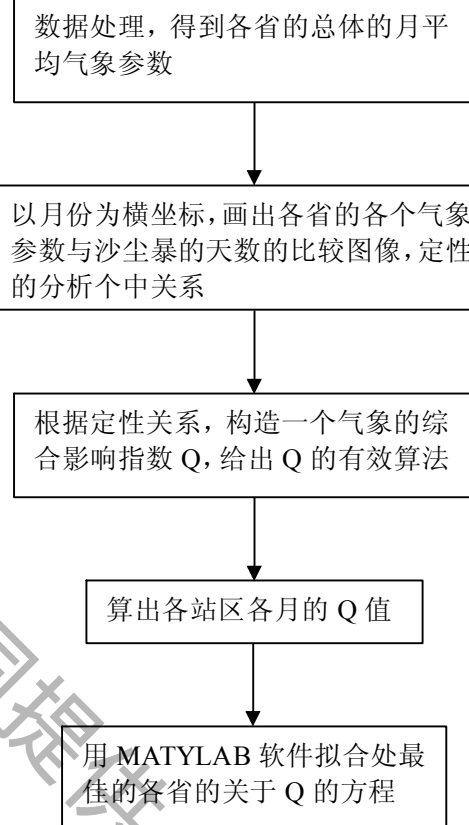
3、月降水量、月相对湿度与沙尘暴发生频率近似呈反比关系，且一年中土壤湿润度在夏秋季节(8, 9月)最大，对应沙尘暴的发生频率最低；冬春季节(12月~5月)是一年土壤湿润度最低的时期，对应春季沙尘暴频率最高。冬季尽管土壤湿润度低，但由于冬季温度较低，地表土壤冻结，使风蚀和沙尘暴发生的可能性大为降低。因此，沙尘暴频率与土壤湿润度呈反比例关系。

4、但是，发现沙尘暴频率与气温月平均值没有直接的确立关系，而画出甘肃省的温差与沙尘暴频率对比曲线时，发现温差与之有十分近似的变化关系，见右图：



可综合考虑各因素对沙尘暴的影响及各自的特点，建立一个气象影响因子，再应用软件和沙尘暴的发生频率进行线性回归，便可得到某个站区的沙尘暴发生频率的预测方程。所以，我们的工作可用以下流程图来清晰表示：

报名号 1090



对于问题一，我们也可以应用计算机软件工具箱中的神经网络模型来对前一部分的大量数据进行学习，得到计算机权值模糊化模型，再代入后一部分的数据进行拟合度检验，判断模型的使用价值。

6、划分等级和预报的分析

问题二，可以在问题一的数据处理基础之上，进一步划分相应的沙尘暴发生的危险级别。

据文献知道，沙尘天气根据能见度和风速分为浮沉、扬尘和沙尘暴，其定量程度较为不足。对于沙尘天气，应该将其分成若干等级或以沙尘指数的方式进行定量研究，这就要求对沙尘天气的观测要更加详细，例如要对风速、挟沙量以及沙粒粒度情况等指标进行详细观测。现有数据又只有次数统计，对于沙尘天气强度较难定级。而已有研究中普遍用风速和水平能见度来定量分级别，有一定的合理性：月平均气温，月降水量，月蒸发量，月相对湿度等都一定程度的反映在了空气的含沙量上了，这又直接影响着水平能见度。

由于实际应用中沙尘暴预测的数据量大，维度高，一般的方法无法达到很好的预测效果。经查阅大量资料表明，要进行近期预报，对沙尘暴预测的数据处理一般用 SVM 聚类或神经网络进行，而神经网络的应用更广泛，精度也比较高。故我们尝试应用 MATLAB 软件中的神经网络工具箱来建立神经网络模型，并采用遗传算法对其进行优化。

模型假设

- 1、假设所给数据可靠。
- 2、忽略题目给出的数据以外的因素（如大气环流、风向、站区面积）对沙尘暴发生频率的影响（针对问题一、二）。
- 3、对于历史记录上几乎不发生沙尘暴的地区，人们并不关注沙尘暴的预报情况。
- 4、忽略个别极端气象情况。

报名号 1090

- 5、某地区沙尘暴的发生仅与当地的观测数据有关系（针对问题一、二）。
 6、在考虑某一因素对沙尘暴的影响是，其他的条件都相同。
 7、不考虑沙尘在各地方的运输（针对问题一、二）。

问题三新增假设：

- 1、在沙尘输送过程中，不考虑湿沉降；
- 2、假设沉沙率与沙尘浓度成正比；
- 3、假设沙尘在空中运行的风向不变。

变量设置

Q	气象影响指数
V	月平均风速
H	相对湿度
T	月平均温度
D	月大风天数
J	月降雨量
Z	蒸发量
N	沙尘暴月发生天数
P1, P2	线性拟合系数
W	发生沙尘暴的危险系数
K	水平能见度
F	风级
VC	速度比差
SC	含沙比差
E	风蚀率
N	植被覆盖率
R	含水率

模型建立与求解

问题一：

各气象因素对沙尘暴频率影响的定量分析

综上所述，为了定量分析气象因素与沙尘暴发生频率的关系我可引入气象影响指数

[3]Q,

其中模型Q的表达式为：

$$Q = \begin{cases} \frac{D^2V}{(J+0.1)HZ} + T & (1) \quad 11\text{月到1月} \\ \frac{D^2V}{(J+0.1)H^2Z} + T & (2) \quad 2\text{月到3月} \\ \frac{D^2}{(J+0.1)Z} \left(2 \times \frac{V}{H^2} + \frac{1}{H} \right) + T & (3) \quad 4\text{月到8月} \\ \frac{D^2V}{(J+0.1)H^2Z} \times \left(1 - \frac{1}{H} \right) + T & (4) \quad 9\text{月到10月} \end{cases}$$

模型的阐释：

其中Q 是用来刻画气候因素对沙尘暴频率的综合影响指数，即气候影响指数；D为

大风次数； V 为风速月平均值； H 是本月土壤湿润度指数； H' 是前月土壤湿润度指数； T 为本月与前月地面平均温度差值； J 为月平均降雨量(J 加0.1表示土壤中的微生物，地下水的作用使土壤保持原有的湿润度)； Z 为月蒸发量。

1、月份的气象因素的差异

在上述诸多气候因素中：由于大风次数对沙尘暴的频率具决定性作用，权重应相对较大一些，所以设置为平方；由于湿润度指数与沙尘暴频率存在着一定的负相关关系，并且月际之间存在着显著的变化。一年中1~8月湿润度指数逐渐变大，9月以后开始变小，但冬季由于地面封冻，土壤水分不易散失，并且湿润度对沙尘暴发生频率的影响较小，因此11月~1月气候影响指数模型调整为(1)式。

2、3月尽管土壤湿润度指数仍然较小，但由于此时地表逐渐融化，湿润度对沙尘暴频率的影响在不断增大，因此2、3月气候影响指数模型调整为(2)式。

另外，考虑到土壤湿润状况在不同季节和月份间发生显著变化，相邻月份土壤湿润状况变化显著，以致对沙尘暴频率产生影响。我们借鉴了Mc Tainsh【4】的研究成果，将相邻月份土壤湿润状况的变化划分为两种情况：一是土壤越来越湿润的变化过程，在这种情况下，前月较低的湿润度可以使本月土壤实际的湿润状况低于本月降水和蒸发状况决定的湿润度，从而使本月沙尘暴频率有所增大；另一情况是土壤越来越干燥的变化过程，此时前月较高的湿润度可使本月土壤实际的湿润状况高于由本月降水和蒸发状况决定的湿润度，而使本月沙尘暴频率有所减小。这种前期土壤湿润度对本月沙尘暴频率的影响，只有在前期湿润度达到一定的程度时才有可能对本月沙尘暴频率产生影响，因此我们将4~8月的气候影响指数模型调整为(3)式。9、10月湿润度指数迅速下降，对应前期较大的湿润度将对本月的沙尘暴频率产生一定的影响，因此气候影响指数模型调整为(4)式。

根据上述的气象指数模型，算出各站区各月的气象指数 Q ，见附录三中。

2、地域差异对沙尘暴影响的不同

我们考虑了用线性拟合，来揭示不同地区气象因子对沙尘暴月次数的影响。

在考虑气象因素的影响时，我们忽略了一些因素的影响，比如其他气候因素、地理等因素。

(1) 气候条件的影响

由于我们只考虑题目给出的气象因素：月平均风速，大风发生次数，月平均气温，月降水量，月蒸发量，月相对湿度对沙尘暴次数的影响，而忽略了其他因素。实际上，不同地区的风向、气流的热传递效应、太阳活动等因素对沙尘暴形成的影响【5】有大有小，必然影响题目中的因素的权重。

(2) 地理因素的影响

应该指出的是：地理因素对沙尘暴的影响在一定程度上是很严重的。

首先是地势和土质的影响，不同的地势与相应的风向的结合，在很大程度上将决定这沙尘暴的形成和影响力。而土质的松软和构成，将影响沙尘暴的沙源，也必然会影响沙尘暴的发生频率。

其次，地表的起伏程度也是一个重要的因素，其将直接影响风带走沙尘的难易程度，要指出的是，并不是地面越平坦，风沙就越易被带入到空中，往往是稍带一些起伏的地形的地区的风沙易被吹到高空。

(3) 最后，还应考虑到植被的分布即覆盖率的影响，好的植被防护林将能很有效的阻止风沙的飞扬。

事实上，沙尘暴的月次数应该是题目中考虑的因素与其他忽略因素的综合结果，我们不妨认为是简单的加权关系，而不同地区的其他因素的不同，必然会导致不同地区的

等效加权系数的差异，从而导致了本题目中当不考虑其他因素时线性拟合系数的差异。

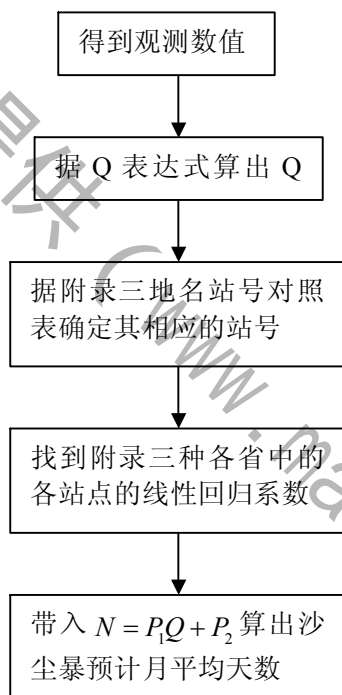
用MATLAB软件对沙尘暴关于气象指数进行线性回归，即可得到各站区的气象指数与沙尘暴的关系式，回归系数见附录三。

其中线性拟合公式为： $N = P_1Q + P_2$

可以看到有相当一部分的站区的沙尘暴记录次数是很少的，致使在线性回归数据表中有一些非数值量。一定程度上说，这些地方与沙尘暴这种自然灾害天气相关性不大，我们甚至可以不必考虑这些地方的沙尘暴预报措施。实际上，社会生活中，人们从心理上也不会关注自己看来几乎不会在身边发生的自然灾害的，预报就显得无关紧要了。所以这些地方的预报在本文中忽略，可以通过其它更浅显的方法来预报。

对于其它的站点，特别是沙尘暴发生比较频繁的典型站点，线性回归的拟合度是较高的，只要有近期的某站点的月平均风速，大风发生次数，月平均气温，月降水量，月蒸发量，月相对湿度的观测数据，就可以通过上面的Q的算法，得到气象影响指数，从附录三中的地名与站号对照表中查到对应的站号，根据所在省及站号查出相应的线性拟合系数，根据线性拟合公式： $N = P_1Q + P_2$ ，进而算出沙尘暴可能发生的次数。

具体流程如下：



这里我们可以认为，某月发生沙尘暴天数即本月沙尘暴次数。

3、模型及计算结果的检验

此模型考虑了月平均风速，大风发生次数，月平均气温，月降水量，月蒸发量，月相对湿度等气候条件对沙尘暴的发生频率的影响，从计算出的结果来看，基本上得到了每一个站区的线性回归系数。而同时得到的系数为极小值的或为不确定值的站点，从发生沙尘暴的频率上来看是很小的，而人们往往并不关心这些地方的沙尘暴预测，所以，我们可以对这些地方不予考虑。

检验时，我们取其中一些站点的数据来检验模型的可信度，据前面的分析我们检验时不应该取沙尘暴发生频率相对来说很小的站点，应为这些地方的系数往往要么很不合实际要么不确定；而我们应该取历史上沙尘暴发生频率比较高的地方来作为模型的检验，因为理论上频率越高的地方的数据拟合度应该越好。

经简单的观测数据比较，我们取宁夏53614号观测站，其近25年来的Q的平均值为

5. 314672, 月平均沙尘暴天数 N 为 0.2891156, 而此站点的回归系数 P_1, P_2 为 0.0552, -0.0043, 由回归模型 $N = P_1Q + P_2$ 可算出估计 N 为 0.2890698994, 相对误差为 1.58×10^{-4} , 比较精确。

问题二：

该模型的建立为了解决两个问题。

1、关于沙尘天气气象等级的划分

关于沙尘天气的划分, 据目前的研究成果来看, 几乎没有一个严格的定量标准, 这是由于地区性差异的存在, 很难用一个统一的标准来衡量不同地区的沙尘天气的等级。内蒙古、陕西、甘肃、宁夏、青海和新疆各省(区) 气象局的预报手册中都提出了各自的分级标准, 而这些标准基本能反映各地沙尘之实况。

有关研究资料【6】将沙尘天气分为浮尘、扬沙和沙尘暴。

浮尘是指尘土、细沙均匀地悬浮在空中, 使水平能见度小于 10 km; 浮尘多为远处尘沙经上层气流传播而来, 或为沙尘暴、扬沙出现后尚未下沉的细粒悬浮空中而成, 太阳呈现白色, 远距离的景物呈现黄褐色; 扬沙是指由于风大将地面沙尘吹到空中, 使空气相当混浊, 水平能见度在 1~10 km 以内; 沙尘暴是指由于强风将地面大量尘沙吹起, 使空气很混浊, 水平能见度小于 1 km, 天空呈现沙褐色, 甚至红褐色。强烈的沙尘暴(瞬时风速大于 25m/s, 风力 10 级以上) 可使地面水平能见度低于 50 m, 破坏力极大, 俗称“黑风”。

国内外目前对沙尘暴的分级大致可归纳为 3 类: ①只分强沙尘暴、特强沙尘暴(俗称“黑风”) 两级。②分为强、中、弱三级; ③分为特强、强、中、弱四级。

研究资料表明沙尘天气气象等级的划分还与空气中沙尘气溶胶厚度有关【7】, 沙尘气溶胶厚度应当与风强度、能见度一起作为评判标准。

我们的理解是, 考虑到能见度在一定程度上已经反映了沙尘气溶胶厚度, 且它们是正关联关系, 所以这里不再将沙尘气溶胶厚度作为划分标准。

综上所述情况, 我们可以根据水平能见度、风强度的观测结果来划分等级。将沙尘天气气象等级的划分情况划出下面表格:

沙尘天气气象等级	浮沉	扬沙	沙尘暴	强沙尘暴
水平能见度	小于 10 千米	1 千米到 10 千米	小于 1 千米	小于 200 米
风级	小于 3 级	3 级到 5 级	6 级以上	9 级以上

观测站测出上述两数据后, 只需对照上表即可粗略判断实时沙尘天气气象等级。

2、预测在近期内观测站所在地发生沙尘暴的风险

分析: 在对沙尘天气气象等级的评估基础上, 要预测近期发生沙尘暴的危险性 W , 则用来预测的观测数据应该是近期发生过或是正在发生的天气现象的数据。

我们可以在对水平能见度 K 以及风级 F 的评测的数据进行更深入的分析。既然要根据观测结果来分析风险, 则观测数据应该是没有发生沙尘暴时的数据。

危险性 W 是由水平能见度 K 和风级 F 同时决定的: F 很大, 但是若 K 很大的话, 即空气中含沙量很小, 发生沙尘暴的危险性就会很小; 同样, 若风级数 F 很小的话, 发生沙尘暴的危险性 W 也会很小。所以, 两者是并行的, 且是相互独立的关系。

建立概率模型:
$$W = \left(\frac{a-K}{A} - 1\right) \times \left(\frac{F-b}{B} - 1\right), \quad K \in [1, 10], F \in [1, 6]$$

同时我们假设： $VC = (\frac{a-K}{A} - 1)$ ， $SC = (\frac{F-b}{B} - 1)$ 。

其中VC，SC 分别代表风速比差，含沙比差。

对于水平能见度K，我们可以认为在大于10千米时就没有分析发生沙尘暴的危险性的必要了，因为空气沙含量太少了，所以定限为[1, 10]。其对W的贡献率为 $\frac{a-K}{A}$ ，根据其范围，可得a、A的值为10、9。

对于风级F，我们同样可以认为在小于1级时也没有分析发生沙尘暴的危险性的必要了，因为没有足够的动力来带动沙子飞动，所以定限为[1, 6]，对W的贡献率为 $\frac{F-b}{B}$ ，同样的方法可计算出b、B值为1、5。

则有发生沙尘暴的风险模型为： $W = (\frac{10-K}{9} - 1) \times (\frac{F-1}{5})$ $K \in [1, 10], F \in [1, 6]$

只需根据观测的水平能见度K和风级F的数值，即可估计出发生沙尘暴的危险性W。例如，当观测得到K=2，F=5时，有近期发生沙尘暴的危险性。

一般的，我们可以得到判定沙尘暴的简单条件是：

$W > 0$ 且 $VC > 0$ 。

即当速度比差和含沙比差同时大于0时，沙尘暴就会发生。

一般情况下，我们有以下几种预测情况：

1、 $W > 0$ ， $VC < 0$ 。风力和含沙量都未达到危险等级；

2、 $W < 0$ ， $VC < 0$ ，风力未达到危险等级，但是含沙量到质能见度小于1000米，这时虽未发生沙尘暴，但空气中含有的固体颗粒很多，能见度很低，在冬春时节常会导致大雾，同时做好监测、预报、防范准备，随时跟踪报道沙尘的动态，同时空气的质量也会很差，建议减少室外活动。

3、 $W < 0$ ， $VC > 0$ ，此时风力达到了危险的要求，即超过了5级，但是由于此时空气中的含沙量不足，所以未发生沙尘暴；这时要考虑地域因素，即地表的植被覆盖率和土壤湿润度，尤其在我国的西北地区，地表覆盖率平均不足50%，而且西北地区的降水量稀少，蒸发量很大，导致土壤的湿润度很低，即含水率很低，这两种因素都会导致风蚀率的增加。若已知土壤中的含水率为R，则风蚀率可以表示为： $E = c + d \times R^2$ ，其中c、d为常数；若已知植被覆盖率为N，那么风蚀率E其相= $830.14 \times (8.2 \times 10^{-5})^N$ 。而且，风蚀率与风速也有定量的关系，对于不同性质（主要指的是土壤的颗粒直径）的土壤，风蚀的速率大有不同。

4、 $W > 0$ ， $VC > 0$ ，这时根据判据，会发生沙尘暴。在沙尘暴侵犯期间，对气候会带来以下的影响：

(1) 对各种辐射的影响，包括对太阳辐射，电磁辐射等。从2004年北京发生的一次强沙尘暴来看，在沙尘暴过程中，总辐射、紫外辐射、光的有效辐射以及净辐射都大幅度减少。沙尘暴对紫外辐射的衰减主要取决于气溶胶中的细粒子的含量。在外地大量沙尘粒输入期间，紫外辐射与总辐射的比值较沙尘暴初期的比重有所增大。

(2) 对面气压的影响，沙尘暴期间，地面处于低气压控制之下；而在沙尘暴过境时和过境后、地面空气显得相对湿冷，地面气压急剧上升，沙尘暴过境后地面处于高压控制下。

(3) 对风力的影响，大量资料研究表明，“风伴沙起，沙助风威”，在沙尘暴期间，风速会达到最大值，这样就更增加了其破坏力。

3、预报的神经网络模型方法

沙尘暴预报是小概率、多因子、高维、样本数据量大、建模样本量不均衡问题，

由于问题的复杂性，研究上一直不能取得比较满意的预报机制。

经查阅资料，我们发现神经网络的广泛的学习、适应和映射能力，恰好能解决这类预测和报警问题。

原理

遗传神经网络

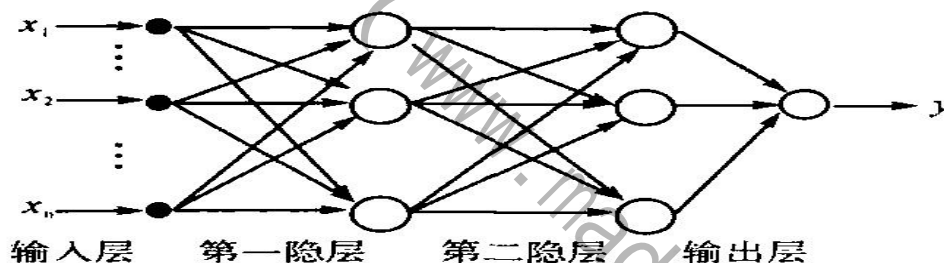
神经网络是一种有导师的学习方法【8】，算法的核心是通过一边向后传播误差，一边利用最小二乘法的最陡下降梯度法进行权值的调整，以实现或逼近所希望的输入输出映射关系。神经网络的结构和学习算法在很大程度上影响着预报的准确率和训练时间。如果只采用神经网络来进行预报，则网络结构的设置和学习算法的选择将是一个较难的问题。而遗传算法（GA）是基于自然选择和遗传规律的并行全局搜索算法，具有较强的宏观搜索能力，具有寻优的全局性，克服了神经算法中容易出现的局部极小问题。对根据预报要求而进行的网络初始结构和学习算法的选择能起到一定的指导作用。遗传神经网络是神经网络的应用发展趋势。

因此，我们尝试通过遗传算法寻找最优神经网络结构。

经大量的数据验证表明，与未曾改进的神经网络相比，新算法收敛速度快，准确率高，有很好的应用前景。

神经网络

人工神经网络（ANN），是对人类大脑系统的一阶特性的一种描述，它是一种数学模型，可以用电子线路实现，也可以用计算机程序来模拟，是人工智能研究的一种方法。其基本模型入图所示。它是一个并行、分布处理结构，由处理单元及其称为联结的无向讯号通道互联而成。网络的传播方向、输入节点和输出节点数视具体问题而定。



BP 网络的全称为 Back-Propagation Network【9】，即反向传播网络。BP 网络是利用非线性可微分函数进行权值训练的多层网络，它包含了神经网络理论中最为净化的部分，由于其结构简单，可塑性强，故在函数逼近、模式识别等领域得到广泛应用。特别的，由于其数学意义明确，学习算法步骤分明，使得应用更加广泛，本文亦采用 BP 神经网络

遗传算法

遗传算法（GA）是以自然选择和遗传理论为基础将生物进化过程中适者生存规则与群体内部染色体的随机信息交换机制相结合的高效全局寻优搜索算法。【10】它能在搜索过程中自动获取和积累有关搜索空间的知识，并自适应地控制搜索过程中以求得最优解。遗传算法可以比较有效的避免陷入局部极优点。

GA 操作包括选择，复制、交叉，变异等算子，从任一种群出发，通过算子随机操作，产生更适应环境的个体，使种群进化到搜索空间中越来越好的区域，这样一代一代不断地繁衍进化，最后收敛到一群最适应环境的个体，求得问题最优解。

而最适应则由适应度函数描述。

模型建立

神经网络隐层数、各隐层节点数及所使用的学习算法均由遗传算法优化决定、隐层节点采用tansig 函数【8】作为激励函数，其表达式为

报名号 1090

$$f(x) = \frac{1 - e^x}{1 + e^x}$$

输出节点的激励函数采用线性函数 purelin 即：

$$f(x) = x, -1 < x < 1;$$

上述各函数均由 matlab 的神经网络工具箱提供。为简化问题复杂性，这里限制层数最大为 2。

遗传算法编码方式

采用二进制编码，将隐含层的神经单元数及所用训练算法作为变量，如

00010 01000 10

前五位表示第一隐藏层有 2 个神经单元，第二隐藏层有 8 个神经单元，最后两位表示采用的算法，其中

00 表示 Levenberg-Marquardt (trainlm)；

01 表示 Batch Gradient Descent with Momentum (traingdm)

10 表示 Quasi-Newton Algorithms 的 BFGS Algorithm (trainbfg)

11 则为 Resilient Backpropagation (trainrp)

括号中单词表示该算法在 MATLAB 中对应表示。

适应度函数

适应度函数由网络训练的泛化误差 e 表示，其为网络训练误差的平均值。

具体步骤如流程图（源代码见附录五）

1、初始化遗传最大进化代数、人口数分别为 50、80；由于神经网络训练时间较长，故训练周期取 35 次。经实验验证，前 30 次训练误差迅速下降，30 次后缓慢变化故取 35 次训练次数是合理的，大量节省学习时间。

2、用 MATLAB 神经网络工具箱提供的 newff 函数生成 BP 网络，并由 train 函数调用 4 种训练算法中的一种进行训练。题目中对结果有影响的因素有温差、风速等六种，输出为沙尘暴频率，故输入层为 6 个神经单元，输出层为 1 个。

3、计算适应度，并对种群进行选择、交叉和变异等操作，分别由编写的 MATLAB 的 m 函数 selection.m、crossover.m、mutaion.m 文件实现。这里选择算子采用最优个体保留的算法，转轮盘选择。交叉率为 0.8，变异率为 0.01。

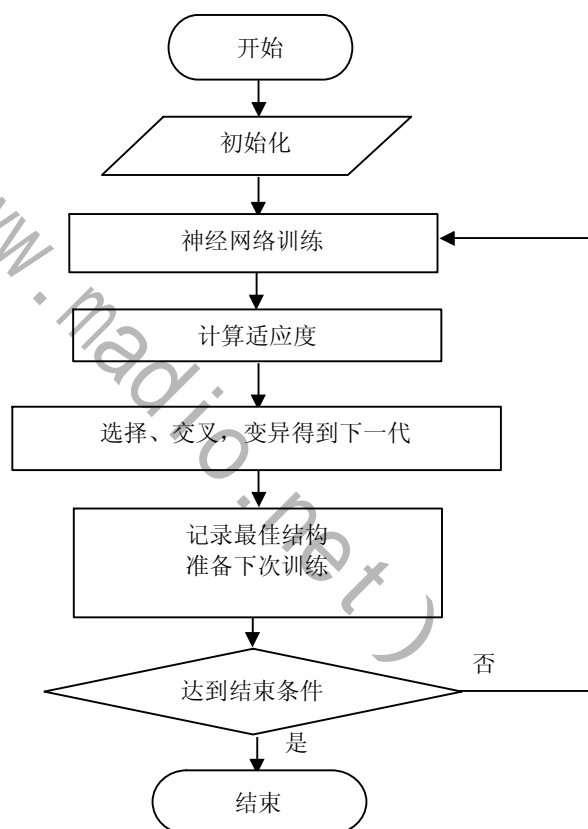
4、记录并选择最优网络结构

5、判断是否达到结束条件。结束条件为当达到最大进化代数或者收敛到所要求精度，这里取 10^{-7} 。

6、进化完成后，用所得到的最优网络结构对题目 81—03 年数据进行训练，最大训练次数设置为 100 次，并用 04—05 年数据测试。

训练结果、测试及分析

1、遗传神经网络训练结果

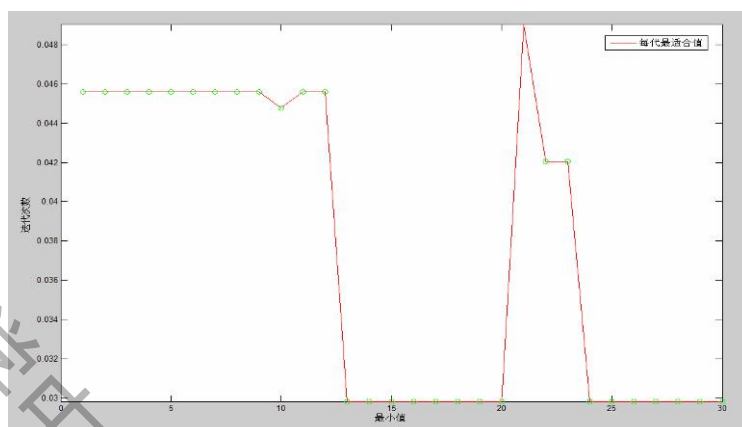


报名号 1090

在训练过程中我们记录每代最适应的个体，以及变化较大的一代种群。

图 1 中红线为变化趋势，绿圈为该代最优值。由图可以看出训练过程中跳过了几次局部最优点，并以较快的速度收敛于全局最优值。

图 1



最后我们可以得到第一隐层神经元数应为 30, 第二隐层为 29, 采用的算法是 trainlm。

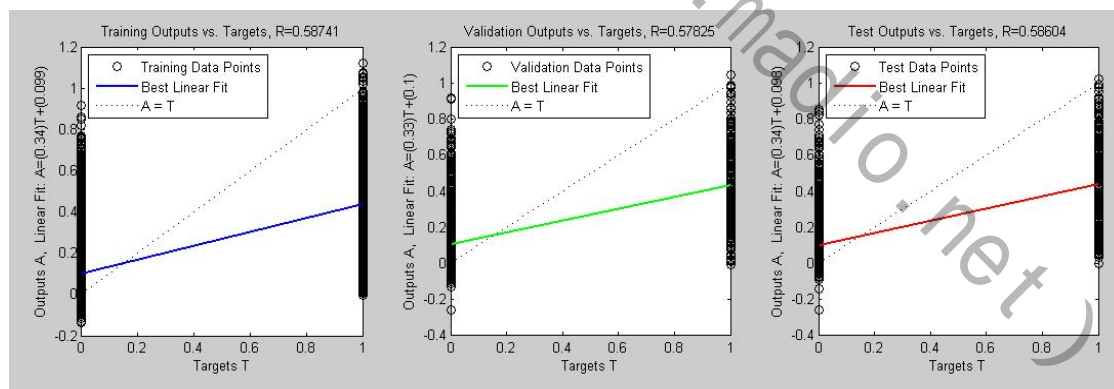
2、使用最优神经网络预测

将六省数据分别置入网络进行训练，测试，得到各省结果。

这里对青海省进行具体分析。输入数据为各气象因子，目标集为是否发生沙尘暴即 0 或 1，这里我们将该月沙尘暴频率大于阈值定为有沙尘暴发生。因当阈值过小时发生沙尘暴的可能性较低，不具有预测性，过大则易漏报，故此处定为 0.08；

由函数 mapminmax 将输入数据规范化，并由函数 dividevec 将其分为三个数据集分别为训练集，验证集，测试集 (train, validation, test)；分别对神经网络进行训练测试，得到拟合结果如图 3 所示。

图 3



其中黑色小圆表示原数据，0 表示无沙尘暴，1 表示发生沙尘暴。带颜色直线为最佳拟合线，虚线为 $A=T$ 时的理想拟合线。此次通过网络计算所得结果平均平方误差 (MSE) 仅为 0.0059，证明神经网络的拟合精度足够高。同时，训练集的回归相关系数 (Regression R Values) 为 0.5871，可以知道输出与目标之间有一定的相关性。

3、测试与预测

用青海观测站 04—05 年的数据共 207 个，其中有沙尘暴的天数为 52 天，发生沙尘暴的百分率为 25.12%。对训练的神经网络进行测试，也即是模拟预测，得到结果如图 4、图 5 所示。其中图 4 是经神经网络预测所得结果，图 5 为目标集。仅由图象就可以看出，它们的包络基本一致，趋势是一样的。

图 4

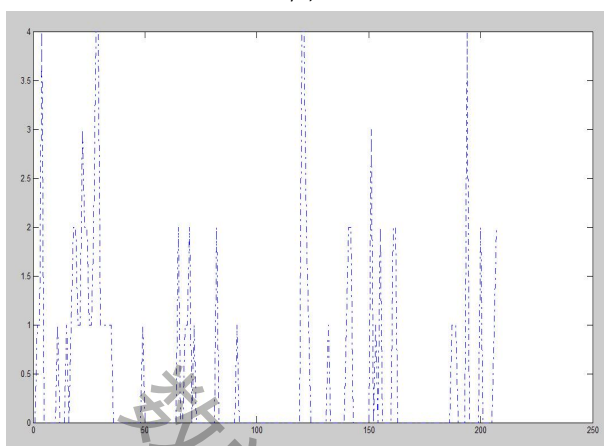
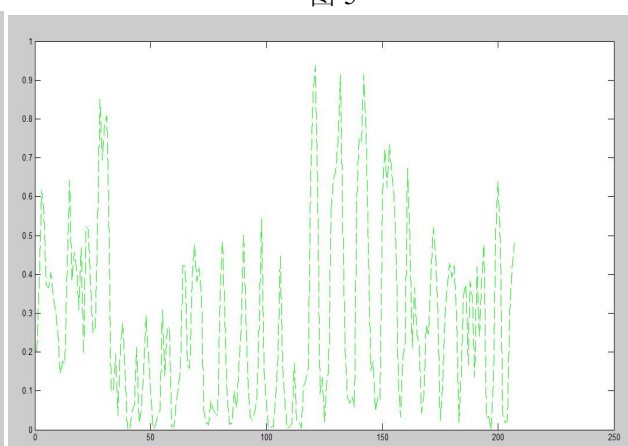


图 5



对其误差进行具体计算可知，相对误差为 9.76%，与未改进的神经网络 13.74%相比有很大提高。

经查阅资料表明【11】，对沙尘暴预测的评价指标一般用成功界限指数CSI表示：

$$CSI = \frac{c_f}{c_f + w_f}$$

其中 c_f 表示正确报出沙尘暴的次数， w_f 为空报漏报次数之和。

由此我们可得下表：

试验数据量	正确报有次数	正确报无次数	空报	漏报	CSI(%)
207	32	127	28	20	40.0
207	21	110	45	31	21.6

从上表我们可以看出遗传神经网络的 CSI 正确率远于高未改进神经网络。由于神经网络有随机性，我们对其进行多组数据多次测试，得到其正确率稳定在 30%到 40%之间。

由此我们可以知道，遗传神经网络最大的优势在于能确定神经网络的最佳结构，解决了 BP 网络隐藏层参数难以确定的难点，使优化后的网络能达到一个较好的精度。

问题三：

问题的进一步分析

问题要求从沙尘在空气中随风传输过程的角度来分析沙尘天气的形成机理，为此我们查阅了大量资料，表明：沙尘天气形成的三个重要的因素是：下垫面、大风、对流层垂直分层的不稳定。

(1) 下垫面是形成的沙尘暴的前提和基础，植被覆盖率，含水量，土壤中径粒的分布规律等，都不同程度地影响着沙尘暴的形成，从机理上看，他们决定了沙尘的临界摩擦速度，该速度是衡量是否有沙尘形成的一个标准。

(2) 大风是沙尘暴形成的动力，大风不仅决定了沙尘的形成，还决定了沙尘的运输，从沙尘的形成方面看，大风可以与形成扬沙的临界风速进行比较，从而可以判断是否有起沙的发生，从沙尘的运输来看，大风决定了沙尘运输的方向和下游的沙尘浓度，对受沙尘影响的地区是否发生沙尘暴有着至关重要的作用。

(3) 对流层垂直分层的不稳定是影响沙尘的摩擦速度一个因素，在近地面不同的观测高度上的风速和温度差形成了扬沙的动力，要形成沙尘还必须满足一个条件：摩擦速度一定要大于临界摩擦速度。

(4) 为了确定扬起沙尘的量的多少，我们可以引入水平通沙量和垂直通沙量两个概念，由此我们可以确定单位时间内扬沙的速率；同时还需引入沙尘浓度概念，通过对

报名号 1090

各地区的能见度与大气中的含沙浓度的关系进行比较，从而能够得到该地区的能见度，随着能见度的不同，沙尘暴的危害等级也不同。

(5) 同时，在沙尘的运输中不断地会有沉粒的下落，从宏观上看，随着时间和空间的推移，大气中的沙尘浓度不断降低，理论上则可以通过建立微分方程的模型得到沙尘浓度与地域的量的关系，若假设风速不变，根据观测站的观测值推算便可确定沙源，同时可以预测该沙源将对那些地区产生影响。

模型基本假设

为了简化问题又不失可行性，我们做了几点假设：

- 1、沙源为纯沙面，无非可蚀性因子；
- 2、在沙尘输送过程中，不考虑湿沉降；
- 3、假设沉沙率与粒径的二次方成正比；
- 4、假设沙尘在空中运行的风向不变。

变量符号说明

u_{mc}	临界摩擦速度
u_m	摩擦速度
ρ_s	沙粒密度
ρ_g	空气密度
d	沙粒直径
Q	水平通沙量
F	垂直通沙量
N	沙尘浓度
f	沉粒的质量分数
z	选择的观测面的高度
K	Karman 常数
ζ	大气稳定度参数
R	梯度 Richardson 数
V	水平风速
θ	脉动温度
T	绝对温度
g	重力加速度常数
$p(d)$	沙粒粒径的分布率
γ	权重系数
ρ_b	土壤体积密度
ρ_p	土壤微粒密度
D_j, σ_j	第 j 种高斯分布的位置参数和标准差
p	土壤的塑性压力
μ	体积扩散系数
ω_j	第 j 种沙粒分布所占的权重

沙尘产生模块

1、临界摩擦速度

临界摩擦速度是一个表示土壤结构基本性质的物理量，它表征土壤表面阻抗风蚀的能力。临界摩擦速度与土壤粒子的粒径，地表性质和土壤含水率等多种因素有关。根据

流体起动条件，作用在粒子上的拖拽力和重力平衡，得出了理论上的临界摩擦速度的表达式，得到临界摩擦速度与粒径的平方根成正比（在一定范围内）。

对于临界摩擦速度，据很多相关科研试验表明粒径在 75 到 100 微米时最小，即该范围内的粒子容易启动。粒径小于 75 微米时，临界摩擦速度会随着粒径的减小而迅速增大，主要是因为微弱的化学键的内聚力增加，地表粗糙度较小等原因造成的。我们引

用如下经验公式【12】： $u_{mc} = A[(\rho_s - \rho_g)gd / \rho_g]^{\frac{1}{2}}$

其中，A 为常数，通常取 0.1， ρ_s 为沙粒密度为 2650 kg/m³， ρ_g 为空气密度 1.295kg/m³，d 为沙粒直径一般在几十到一千微米，通过沙源的实际测量值可以得到沙粒直径平均值，所以这里我们当作已知量处理。

2、摩擦速度

摩擦速度是与大气环流条件和近地面层空气运动性质有关量，由于沙粒旨在一定的条件下才开始运动，当风力增大到某一临界值以后，地表沙粒开始脱离静止而进入运动状态，这个使沙粒开始运动的临界风速称为临界摩擦速度。可见，要产生沙粒的运动，须使风速大于临界摩擦速度。决定摩擦速度的有气象条件（风速，降水和气温等），土壤状况（水分，紧密度和聚集度），地面的条件（粗糙度，植被覆盖，地貌，防风林等）。一般的摩擦速度由下列公式【13】计算：

$$\frac{kz}{u_m} \frac{\partial u}{\partial z} = \phi_m$$

$\frac{\partial u}{\partial z}$ 是速度梯度，我们假设速度均匀变化的，即该速度梯度是常数。

K 是 Karman 常数，一般取 0.4；z 是高度； ϕ_m 是风 Monin-Obukhov 相似性函数，有以下形式：

$$\phi_m = \begin{cases} (1-16\zeta)^{-\frac{1}{4}}, \zeta \leq 0 \\ (1+5\zeta), \zeta > 0 \end{cases}$$

其中 ζ 是大气稳定度参数，能用下列关系近似确定：

$$\zeta = \begin{cases} 1.0R, R < 0, \\ R/(1-5R), R > 0 \end{cases}$$

其中 R 梯度 Richardson 数： $R = \frac{g(z_2 z_1)^{0.5}(\theta_2 - \theta_1)}{T(V_2 - V_1)^2} \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)$

于是，只要测定两个不同高度的水平风速，温度等信息，就可以确定摩擦速度。

3、判断临界条件

根据以上的叙述，判断是否有扬沙可用下列关系式：

$u_m > u_{mc}$ ，摩擦速度大于临界摩擦速度则发生扬沙；

$u_m < u_{mc}$ ，摩擦速度小于临界摩擦速度则不会发生扬沙。

4、水平沙通量

在 $u_m > u_{mc}$ 的情况下，反映的是进行跳跃运动的沙粒量，其物理意义是指单位时间内单位宽度从地表到积分高度处所形成的垂直平面（与水平风向垂直）内通过的沙粒质量。

据相关资料风洞实验和观测表明，风作用下的土壤颗粒依粒径 d 不同其运动方式有：悬浮 ($d < 70 \mu\text{m}$)、跃移 ($70 < d < 1000 \mu\text{m}$) 和蠕移 ($d > 1000 \mu\text{m}$) 3 种。其中，土壤颗粒

运动以跃移运动为最重要，跃移运动又与其它两种运动紧密相关，关于特定粒径的表达

可用经验公式【14】： $Q(d_i) = \frac{c\rho_s u_m^3}{g} [1 - \frac{u_{mc}}{u_m}] [1 + (\frac{u_{mc}}{u_m})^2]$ 表示。

$C=2.6$ 为经验常数，对于不同的粒径的沙粒系统，总的水平沙通量为：

$$Q = \int Q_i(d) p(d) dd$$

$P(d)$ 为各种径粒的分布规律【15】，考虑到风蚀起沙过程中，一部分土壤微粒被抬升脱离地表，导致土壤粒子尺度分布随时间发生变化，进而影响到地表土壤的风蚀起沙量，其统计规律为：

$$p(d) = \gamma p_m(d) + (1 - \gamma) p_f(d)$$

$p_m(d)$ 是地表土壤遭受最小程度破坏时粒子尺度分布的概率密度函数， $p_f(d)$ 是地表土壤遭受最大程度破坏时粒子尺度分布的概率密度函数， $p_m(d)$ 和 $p_f(d)$ 表征的是地表土壤两种理想的粒子尺度分布状态，对不同类型的地表土壤其分布特征也不同，具体计算时可通过3~4种高斯对数分布拟合，其形式如下：

$$p_i(d) = \frac{1}{d} \sum_{j=1}^J \frac{\omega_j}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \exp[-\frac{(\ln d - \ln D_j)^2}{2\sigma_j^2}],$$

其中下标 $i=m$ 或 f ， J 是高斯对数分布的个数，一般取3~4， ω_j 是第 j 种分布所占的权重， D_j 和 σ_j 分别是第 j 种高斯分布的位置参数和标准差，这三个参数均可根据观测到的粒子尺度分布利用最小二乘法确定。 γ 和 $(1 - \gamma)$ 分别是 $p_m(d)$ 和 $p_f(d)$ 在风蚀起沙时所占的权重 $\gamma = e^{-t(u_m - u_{mc})^n}$ ， t 和 n 是两个经验系数，近似取27.3和3， γ 随 u_m 和 u_{mc} 变化也即随时间变化，从而使 $p(d)$ 也随时间变化。经验表明，各种粒径的沙尘都服从正态分布。

5、垂直沙通量

垂直沙通量 F 表征的是风蚀过程中地表尘粒的排放量，其物理意义是指单位时间内某一高度处与地表面平行的单位面积内通过的尘粒的质量。

空气中沙粒运动的性质，起沙模式中将有三种起沙机制，它们是：

(1) F_a ：由于空气的动力作用粒子直接脱离地面而悬浮在空中产生的起沙率。理论上，沙尘粒子可以被空气动力直接抬离地面，对于较小粒子重力和空气动力的重要性相对减小，而粒子间作用力变得相对重要，沙尘粒子不易被风吹离地面，因此直接由空气动力造成的起沙率一般很小。

(2) F_b ：由于粒子的跃移碰撞产生的起沙率。当跃移粒子(沙粒或尘聚集体)撞击地面时，该撞击引起的局地冲击力足以使地面土壤粒子克服粒子间的束缚，被跃移粒子冲击起沙。风洞实验表明，这种机制引起的起沙率大大超过由空气直接夹带产生的起沙率。

(3) F_c ：粒子的破裂和聚集体破碎产生的起沙率。在自然条件下，沙土中尘粒是以附着在沙粒表面或是以较高粘性聚集体的方式存在。弱风蚀时，包裹着尘土的沙粒和尘土聚集体的行为方式类似单个沙粒，细小的尘粒不会释放出来；然而强风蚀发生时沙粒表面的尘土和尘土聚集体就会破碎，释放出尘粒。 F_c 就是表示由粒子的破裂和聚集体的破碎产生的起沙率。

三种起沙机制的总起沙率为 $F = F_a + F_b + F_c$ ，由于3种形式的起沙机制不同，因而，在起沙模式中对它们分别进行处理。

在起沙模式中，沙尘按粒径分为6组：

$d \leq 2L_m$ (黏土)， $2 < d \leq 11L_m$ (细粉土)， $11 < d \leq 22L_m$ (中粉土)， $22 < d \leq 52L_m$ (大粉土)， $52 < d \leq 90L_m$ (细沙)， $90 < d \leq 125L_m$ (中沙)。

采取这种分组是根据大气中观测到的尘粒的粒径分布，起沙模式对每个粒径组都计算起沙率。得出垂直尘通量 F ，就可知该次沙尘暴天气的起沙源地、强度的空间分布、时间演变等。

对于某个粒径组的粒子，其垂直沙通量为：
$$F_i(d) = \frac{C_\alpha g f \rho_b}{2p} (0.24 + C_\beta u_m \sqrt{\frac{\rho_p}{p}})$$

其中, f 是下沉尘粒所占比例, ρ_b 是土壤体积密度, 通常为 1000kg/m^3 , ρ_p 是土壤的微粒密度可取 2650kg/m^3 , p 为土壤的塑性压力通常为 $2 \times 10^6 \text{N/m}^2$, p 是粒子与土壤表面相互作用时粒子受到的土壤表面弹力, C_α 和 C_β 是量级为 1 的系数可取经验值分别为 5.0 和 1.37。对非可蚀性因子只在计算 Q 时考虑, 土壤表面总的垂直尘通量为在整个粒径范围的积分, 由于 p 较大 (达到 10^5 数量级), 同时略去 C_α 和 C_β 的作用。上式可简化为:

$$F_i(d) = \frac{C_\alpha 0.12 g f \rho_b}{p} Q$$

沙尘浓度是：
$$N_i(x_0, t_0) = \int_{t_0}^t \frac{F_i(t)}{\mu} dt$$

μ 为体积扩散系数, 表示的是垂直的起沙后的扩散, 在大气中逐渐均匀。总结上述的分析建立模型如下:

$$\begin{cases} \frac{kz}{u_m} \frac{\partial u}{\partial z} = \phi_m \\ Q(d_i) = \frac{C_\alpha \rho_g u_m^3}{g} [1 - \frac{u_{mc}}{u_m}] [1 + (\frac{u_{mc}}{u_m})^2] \\ N_i(x_0, t_0) = \int_{t_0}^t \frac{F_i(t)}{\mu} dt \\ F_i(d) = \frac{C_\alpha 0.12 g f \rho_b}{p} Q \end{cases}$$

沙尘运输模块

简化问题:

沙尘在空气中的运输包括平流, 扩散, 干下沉等三个主要过程, 对于平流, 为了问题的简化, 我们假设沙尘随风作直线运动; 对于扩散, 我们引入了体积扩散系数, 定义为单位时间内扩散的体积占原来体积的比, 随着扩散的进行, 扩散系数会变得越来越小, 最终达到平衡, 我们这里不考虑扩散的时间, 只考虑扩散的结果; 对于干下沉, 由于我们不考虑湿下沉, 假设其余沙尘的浓度成正比, 于是我们就可以建立动态的微分方程来解决问题。

因为下沉的沙量与空中沙尘的浓度成正比, 故我们有下列关系式:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = -f_i N_i$$

初始条件为:

$$N_i(0, 0) = N_i(x_0, t_0),$$

我们可将其视为沙源点的沙尘浓度。

解上述关系式, 可以得到浓度随时间的变化关系为:

$$N_i(t) = N(0)e^{-f_i t}$$

对于不同粒径的沙粒, 其下沉比是不同的, 同一种粒径的沙尘, 其下沉比是常数。在任意时刻, 任意位置大气中的沙尘总浓度与各种径粒沙尘浓度间的关系为:

$$N(x, t) = \sum_{i=1}^n N_i(x, t)$$

其中， n 为粒径种类数，这里取 $n=6$ 。

而随着时间的推移，大气中的沙尘浓度也会相应减少，故我们可建立运输模型。

考虑到沙尘浓度与地域的关系，随着大风的搬运，空中的沙尘飘向下游，而同时又有沙尘的降落，因此在理论上，一定得地域范围内，沙尘浓度和沙尘搬运的距离有一定的关系。

假定风速（风力，风向）不变，考虑沙源下游 $x(t)$ 处：

$$x(t) = Vt$$

将其与时间的统一起来建立运输模型如下：

$$\begin{cases} \frac{\partial N_i}{\partial t} = -f_i N_i \\ x(t) = Vt \end{cases}$$

于是我们可通过观测下游的站点的沙尘浓度、风向和风力并在站点分布图上进行相应的标定，可以估计沙源的大致位置。

模型综述

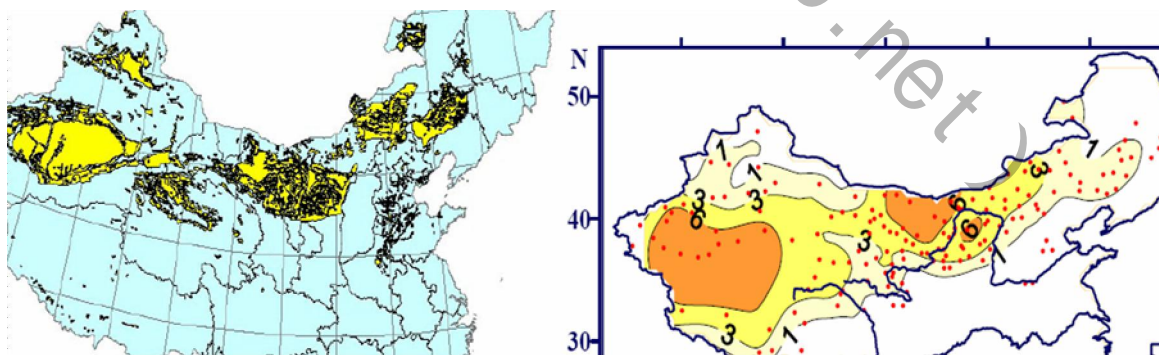
1、起沙模型

$$\begin{cases} \frac{kz}{u_m} \frac{\partial u}{\partial z} = \phi_m \\ Q(d_i) = \frac{c \rho_g u_m^3}{g} \left[1 - \frac{u_{mc}}{u_m} \right] \left[1 + \left(\frac{u_{mc}}{u_m} \right)^2 \right] \\ N_i(\vec{x}_0, t_0) = \int_{t_0}^t \frac{F_i(t)}{\mu} dt \\ F_i(d) = \frac{C_{\alpha} 0.12 g f \rho_b Q}{p} \end{cases}$$

2、沙尘运输模型

$$\begin{cases} \frac{\partial N_i}{\partial t} = -f_i N_i \\ x(t) = Vt \end{cases}$$

附： 下图作为我国北方沙漠分布图，右为个别观测站点分布图



模型及结果分析

我们可通过观测下游的站点的沙尘浓度，风向、风力和所取站点进行对照，可以估计沙源的大致位置。同时可以根据沙尘浓度的大小，可以设定沙尘天气的等级，不仅可以做到沙尘的预报和预警，同时可以确定沙源所影响的地区。通过我们的测定，分析，可以得到我国沙源的一些结论：

统计全国各月沙尘暴记录情况，一年中3、4和5月沙尘暴发生次数偏高，尤其以4月

报名号 1090

份沙尘暴发生次数为全年最高。5 月以后沙尘暴发生次数急剧下降, 9 月和 10 月为最低。春季沙尘暴发生频率高, 除了与一年之中春季风速较大有关外, 还与此时地面开冻融化、气温上升、降水稀少, 使得裸露的沙土结构逐渐变得松散, 一旦有较强的天气系统活动就很容易产生沙尘暴有关。夏季雨水相应增多, 风力减弱, 下垫面植被覆盖率增高, 沙尘暴发生的机率也随之减小。秋季沙尘暴发生频率为全年最低。冬季地面冻结, 一般来说大风难以将冻结成块的沙土吹离地面而形成沙尘暴, 冬季沙尘暴发生的次数也较少。

进一步统计表明, 北方地区沙尘暴的有 2 个多发区: 南疆塔里木盆地和甘肃河西走廊, 发生频率最高的月份均在 3 月至 5 月; 发生频率最低的月份略有差异, 河西走廊为 9 月, 南疆地区为 12 月; 北疆地区沙尘暴发生频率最高在 5 月, 其次是 4 月和 6 月, 最低是 1 月。从统计的结果来看, 3 个区域均是春季沙尘暴发生频率最高, 夏季次之, 新疆冬季发生频率最低, 甘肃河西走廊则是秋季最低。

沙源:

为了确定内源型沙尘暴过程的源地, 考虑到沙尘暴起源于沙漠和沙地, 将各气象站所在行政区成为沙尘暴源地的次数分布图与我国沙漠及沙地分布图进行空间叠加, 最终得到我国沙尘暴发生源地的空间分布:

沙尘暴起源于沙漠及其边缘地区, 主要集中在南疆的塔克拉玛干沙漠及其周边地区、北疆的准噶尔盆地南沿、甘肃河西走廊和内蒙古干燥沙漠及青海柴达木盆地等地, 影响的主要地区是甘肃、宁夏、内蒙古、北京等大部分地区。如图表示:



图：沙尘暴的移动路径



图：沙源分布图

模型的改进

临界摩擦速度的确立

我们建立模型的时候仅考虑临界摩擦速度与沙粒直径的平方根成正比，实际上 u_{mc} 也是受土壤湿润度和植被覆盖的影响的，有关研究表明，临界摩擦速度可以通过下列计算：

$$u_{mc} = H(w)R(\lambda) \sqrt{A_N(\sigma_p g d + \frac{\varepsilon}{\rho_g d})}$$

其中 A_N 和 ε 是经验常数，分别近似取 0.0123 和 $3 \times 10^{-4} \text{ kg/s}^{-2}$ ； σ_p 是土壤微粒密度 (2650 kg/m^3) 和空气密度 (1.265 kg/m^3) 的比值。

$H(w)$ 表征地表土壤水分对风蚀起沙的阻碍作用，其表达式为：

$$H(w) = \begin{cases} 1, & w < w' \\ \sqrt{1 + a(w - w')^b}, & w > w' \end{cases}$$

其中 a , b 为经验常数， w' 是土壤水分是否具有明显阻碍作用的临界值， a , b 和 w' 的大小均决定于土壤类型。

$R(\lambda)$ 表征植被覆盖对风蚀起沙的阻碍作用，其表达式根据 Raupach 的研究得到，即

$$R(\lambda) = \begin{cases} 1, & \lambda = 0; \\ \sqrt{(1 - m\sigma\lambda)(1 + m\beta\lambda)}, & \lambda > 0 \end{cases}$$

其中 σ 是植被的根部面积与叶面面积之比，经验值取 1.45； β 是单个植被元素的拖曳系数与没有植被的地表的拖曳系数之比，经验值取 202； m 是一个 < 1 的常数，经验值取 0.16； λ 是植被的切面积指数，决定于植被覆盖分数 f ，由以下经验公式确定：

$$\lambda = \begin{cases} 0 & f = 1 \\ -0.35 \ln(1 - f) & f < 1 \end{cases}$$

通过改进，模型能更客观的反映下垫面对风蚀的影响效果，比原来的模型更具有实用性和合理性。

模型评价

问题一的解答，本文建立了各个站区的沙尘暴发生频率的气象影响指数模型，全面考虑了月平均风速，大风发生次数，月平均气温，月降水量，月蒸发量，月相对湿度等气候条件对沙尘暴的发生频率的影响，基本上得到了每一个站区的线性回归系数，且建立的模型计算出的沙尘暴频率与实际观测数据具有一定的拟合度。但也有一定的缺陷，由于本题的模型的建立是建立在对数据和图像的分析上的，尤其在得到各因素对沙尘暴的影响方面，仅从定性的角度的基础上，因而没有给出具体的定量的表达式，因此模型显得有些过于简单，对于一些月沙尘暴次数极少的站区没能得到确实的线性拟合系数，在分析中给与了忽略，一些拟合系数算出的数据与实际有一定的差异。但是从效果上看，该模型的结果与实际吻合较好，这就说明了该模型具有一定的适用性。该模型的思路是从感性到理性，从假设到验证，体现了一般的科学研究方法。

问题二的模型从空气含沙量和风速两个观测因素来考虑对沙尘天气的预报，对关系的讨论比较透彻，简单的从近期可观测到的数据入手来预测发生沙尘暴的危险性。从分析上来看，该模型是一个能够较客观地反映沙尘的评判标准，同时起到预测的作用，一定程度上达到了题意的要求。但由于模型的建立仅就两个关键因素：风速、能见度进行研究，不免遗漏了其他方面的因素，如地理位置、地形、土壤等。同时，对风速和能见度的相互关系上分析不够深入，二者对沙尘暴发生的贡献率很可能不是简单的一比一的关系，应适当考虑各自的权重。

对于沙尘暴的近期预测的神经网络模型，我们用遗传算法对原前向神经网络进行了优化，避免了神经网络初始的盲目性，减少了多次重复实验确定参数的不准确和时间的浪费。但由于神经网络本身仍存在许多未解决的问题以及沙尘暴预测的数据特点，神经网络模型要实际预报中应用还有许多问题有待处理。

问题三通过建立沙尘暴的机理模型，进一步从形成过程的角度阐述了沙尘天气中起沙与沙尘运输的数学本质，并建立了沙尘暴的评判和预报机制，贴合实际，具有一定的现实指导意义，本文建立的模型简化了很多问题，提高了可读性。但为了问题的简化，假设过多，不免会忽略了一些比较重要的因素。另外，沙尘暴形成的某些过程没有给予充分的解释，也没有充分的数据来验证。

模型的进一步讨论

1、对于问题一的气象因子模型的讨论

不失一般性，我们取出 11 月到 1 月的气象因子模型： $\frac{D^2V}{(J+0.1)HZ}+T$ 进行分析讨论。

其中 Q 是用来刻画气候因素对沙尘暴频率的综合影响指数，即气候影响指数； D 为大风次数； V 为风速月平均值； H 是本月土壤湿润度指数； H' 是前月土壤湿润度指数； T 为本月与前月地面平均温度差值； J 为月平均降雨量(J 加0.1表示土壤中的微生物，地下水的作用使土壤保持原有的湿润度)； Z 为月蒸发量。

由前文的定性分析，我们可以得到的关系是：沙尘暴频率与 V 、 D 、 T 成正相关的关系，而与 J 、 H 、 Z 成负相关的关系。但是，各自对于沙尘暴频率的影响程度的大小的定量比较并不明确，所以模型的建立从形势上就显得自由度较大，并且模型形式将对模型的有效性起决定性作用。

本文中建立的初始模型，是根据前人的研究成果（见参考文献【3】）而改进得到的形式，充分考虑到了大风对沙尘暴发生的重要作用：据有关风洞试验研究资料表明在风速超过某一值后，即使空气中含沙量很少，也会发生沙尘暴天气。

但模型的致命缺点在于对 V 、 T 、 J 、 H 、 Z 的具体关系上的研究很有限，而现阶段这方面的研究也少有突破，所以对于它们的相互关系，以及综合起来后对沙尘暴形成的综合效果还有待科学实验来进一步研究，发现其中的微妙关系。

2、对于问题二的概率模型的讨论

概率模型 $W = (\frac{a-K}{A}-1) \times (\frac{F-b}{B}-1)$ ，是基于风速 F 和水平能见度 K 基本没有关联，而建立的独立事件的概率模型，然而发生什么沙尘天气与二者是否存在概率关系，还有待于进一步验证。

假若是随机事件的概率问题，风速与空气含沙量对沙尘天气的等级影响是否平等，以及影响是否是线性的，还有推敲的空间，我们这里为了简化问题假设它们是等价的，且成线性影响关系，建立这个概率模型，不失为一种考虑问题的方法。

3、对于风速与风蚀率关系的分析

下面重点讨论风速与风蚀率的关系【16】：

(1) 净风和挟沙风与土壤风蚀的关系

在净风和挟沙风的吹蚀下进行对比实验发现，在同一风速下挟沙风与净风作用于同一种土壤引起的风蚀量具有明显差异(表1)，前者是后者的4.3~72.9倍。这是因为在净风吹蚀下土壤表面主要受风的剪切应力作用，其力大小主要与风速大小有关；而在挟沙风中，除了有净风对土壤表面产生剪切力外，还有运动沙粒对土表产生的直接撞击力的影响。气流的挟沙能力随流速增加而增大，当上风向沙源充足时，气流速度达到起沙风速以上，即开始出现风蚀，且随气流挟沙能力的增大风蚀量迅速增加。但挟沙风对不同

报名号 1090

类型土壤的风蚀量也不同，如挟沙风对粉沙质壤土的风蚀量仅为净风的4.63倍，而固定风沙土是5.24倍，半固定风沙土则高达72.9倍。这主要是因为不同类型土壤表面性质不同的缘故。因此，在风蚀地区设法切断上风向沙源，避免风沙流对地表的直接冲击，是减小土壤风蚀的重要环节。

土壤类型	式样面积(平方厘米)	气流状况	风力等级	总风蚀量(公斤)	倍数
粉沙质土壤	95×30	净风	4-12	2.06	1
		挟沙风	4-12	8.99	4.36
固定风沙土	95×30	净风	4-12	2.15	1
		挟沙风	4-12	11.27	5.25
半固定风沙土	58×26.5	净风	8	0.11	1
		挟沙风	8	8.12	72.9

(2) 风速与风蚀的关系

由实验结果可见，在其他条件相同的情况下，风速越大，风蚀愈烈。由于流沙表面质地松散，当风速5-6m/s时开始出现风蚀现象，7m/s已形成风沙流，10m/s风沙流已相当强烈，10m/s上时随风速的增大，风蚀量呈直线上升趋势。对于同一地区的沙质草甸土，由于有稀疏草类生长而相对流沙样品质地坚实，在风速7-8m/s开始出现轻微风蚀，且局部地表出现微风蚀形态，当风速9m/s，风速与土壤风蚀量的关系普遍出现风蚀，随着风速增大风蚀量明显增加，且风蚀量与风速之间存在着幂函数关系，可以近似地看作二次幂（研究表明）。由于不论物质类型和存在状态如何，风蚀机理是相同的。风蚀量与风速之间的二次幂函数关系反映了风蚀过程中的一个机理性问题，即在风蚀过程中，气流作用与地面物质之间存在的内在联系是能量转化关系，风能的大小决定同一物质风蚀量的大小。被蚀物质类型及存在状态不同时，风能的转化率及效应不同是造成风蚀量差异的根本原因。

(3) 风蚀与地表物质粒度组成关系

地表物质的粒度组成影响风力作用下颗粒的受力状况与效果，因而影响土壤风蚀。据有关研究将土壤粒度组成按其抗风蚀性的差异划分三部分，即小于0.42mm的高度可蚀因子，0.42~0.84mm为半可蚀因子，大于0.84mm为不可蚀因子。据相关室内风洞中实验证明，不可蚀颗粒粒径是随土壤种类、结构和风力而改变的，理论和实验均表明，风蚀率与粒径有很大关系。

综上所述，沙尘暴与风速是有很大的关系的。即使空中沙粒含量没有达到能见度小于1000米的程度，但是由于风力效应，空中的沙也会有所增加，最终由量变到质变，引发沙尘暴，不得不重视。

问题扩展

1、我国沙尘暴加剧原因

在全球气候变化的影响下，我国北方地区干旱和暖冬现象日益加剧，加之不合理的人为活动的干扰，造成了大面积植被的破坏，加剧沙化、水土流失、土壤次生盐渍化和土壤物理性质的恶化。荒漠化正在加速蔓延和扩展是强沙尘暴灾害频繁发生的主要原因。多年来我国对沙化土地既有治理，也有破坏，总体上破坏大于治理。有的地方由于不合理的人为活动，滥垦、滥伐、滥樵、滥牧、滥用水资源，造成了大面积植被的破坏，加剧沙化、水土流失、土壤次生盐渍化和土壤物理性状的恶化，土地沙化过程在蔓延和扩展。

2、未来变化趋势

观测资料的分析表明，近几十年来，我国北方地区的气候有明显的干旱化趋势，地

表湿润指数和土壤湿度明显变小, 这为沙尘暴的发生提供了气候背景。在全球增暖的影响下, 北半球中纬度内陆地区, 降水量变化不大, 但温度显著升高, 地表蒸发加大, 土壤变干。这是有利于沙尘暴发生的不良气候背景, 再加上土地资源利用不合理的局面短期内难以根本扭转, 草地资源退化和减少的状况难以根本改变, 以及水资源短缺的矛盾日趋严重, 应当引起我们的重视。

3、对策建议

(1) 做好科学的还林还草工作, 大范围地恢复自然植被。

(2) 实施西部开发战略应重视生态环境建设, 要把生态效益、经济效益、社会效益结合起来考虑西部开发战略的实施, 将会加快西部地区的交通建设、城市建设、工业建设的步伐, 使水资源紧缺问题更为突出, 从而对生态环境形成更大的压力。

(3) 建立和完善沙尘天气的动态监测、预警系统, 做好防灾减灾的科学研究工作对全球天气变化趋势的把握需较长时间的科学积累和能力建设, 而大面积恢复林草植被也需较长时间的努力。

参考文献

- 【1】方宗义, 朱福康等编著. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997. 1 – 10
- 【2】胡 波, 王跃思等. 北京2004 年一次强沙尘暴过程的辐射特征研究. 气候与环境研究. 第10卷 第2期: 2005.6
- 【3】李艳春, 赵光平等. 气候因素对宁夏中北部沙尘暴频率影响的模拟研究. 高原气象. 第24卷 第3期: 第438页, 2005.6
- 【4】McTainsh G H, Lynch A W, Burgess R C. Winderosion in eastern Aust ralia[J] . J Soil Research, 1990, 28 : 323 – 339
- 【5】李栋梁, 钟海玲. 我国沙尘暴的气候成因及未来发展趋势. 中国环境科学 14~18 2007.27(1)
- 【6】中央气象局地面气象观测规范[M] . 北京: 气象出版社, 1979.
- 【7】李霞, 胡秀清等. 南疆盆地沙尘气溶胶光学特性及我国沙尘天气强度划分标准的研究. 中国沙漠. 第25卷 第4期20057
- 【8】路志英, 杨玉峰等. 基于遗传神经网的沙尘暴预测模型的研究. 计算机工程与应用, 2005. 33
- 【9】神经网络理论与 MATLAB7 实现. 飞思科技产品研发中心编著. 北京: 电子工业出版社, 44 页
- 【10】雷英杰 张善文等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用. 西安电子科技大学出版社
- 【11】赵翠光. 人工神经网络方法在沙尘暴短期预报中的应用. 气象 第30卷 第4期
- 【12】邢 茂, 郭烈锦. 低含水率沙床的临界起沙风速
- 【13】赵林娜、孙建华、赵思雄. 一次引发华北和北京沙尘天气起沙机制的数值模拟研究
- 【14】赵林娜、孙建华、赵思雄. 一个适用于我国北方的沙尘暴天气数值预测系统及其应用试验
- 【15】申彦波、沈志宝等. 风蚀起沙的影响因子及其变化特征
- 【16】屈建军等. 沙尘暴风洞模拟实验的综述. 干旱区资源与环境, 第 18 卷. 2004 年 3 月