

沙尘暴与各项气象指标的关系分析

马桢干,陈奕山,伍骏骞

(南京农业大学 经济管理学院,南京 210095)

摘要:沙尘暴的产生主要是受三大因子支配:强风因子,热力动力不稳定因子和沙尘源因子。先将强风因子与月均大风天数、月均风速相联系;将热力因子与月均温,月相对湿度相联系。另外,考虑到沙尘暴形成与土地植被、土地结构状况相关,将土壤状况与月降水量、月蒸发量、月相对湿度相联系。

关键词:沙尘暴;各项气象指标;相关分析

中图分类号:P461 文献标志码:A 文章编号:1673-291X(2008)13-0154-04

一、问题重述与分析

(一)问题重述

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。具体问题如下:

问题一:请根据前两个阶段的研究,将中国西北地区的不同观测站点进行分类,建立模型,以描述每种类型地区中沙尘暴的天气成因。

问题二:对引起沙尘暴发生、发展的气候背景和天气成因建立适于业务应用的预报指标系统。可根据需要选取不同的数据,但需要考虑数据的易获得性和模型的健壮性。

(二)问题分析

1.分析沙尘暴的形成过程

沙尘暴是由于强风将地面大量的沙尘卷入空中,致使空气特别混浊,水平能见度低于1km的风沙天气现象。沙尘暴的产生主要是受三大因子支配:1)强风因子,2)热力动力不稳定因子,3)沙尘源因子。

据题目已有资料,本文先将强风因子与月均大风天数、月均风速相联系;将热力因子与月均温,月相对湿度相联系;考虑到沙尘暴形成与土地植被、土地结构状况相关,将土壤状况与月降水量、月蒸发量、月相对湿度相联系。

2.对问题的分析

(1)对问题一的分析

合理的分类,指标有三类:

1)沙尘暴的形成机理的分析:影响沙尘暴的形成具有三大重要因素。根据动力不稳定因子、干燥系数、地表状况指标这三个影响沙尘暴重要的评判标准,在以各个省为单位,将观测点分为:危险区、警报区、防御区、普通区。

2)确定沙尘源:用聚类分析法初步确定沙尘源。主要沙尘源的位置由两方面的因素确定:a.动力不稳定因子、干燥系数、地表状况指标这三个影响沙尘暴重要的评判标准(即属于危险区、警报区、防御区、普通区中的那个区);b.发生沙尘暴的可能性大小。其影响范围也由两方面的因素确定:a.发生沙尘暴的可能性大小;b.与其他观测点间相关性的大小(越大认为影响范围越大)。

3)通过相关系数确定各个观测点之间的空间相关程度以及和沙尘源的地理位置、影响范围。分析各个省内同等级区域的观测点的观测数据是否具有相关性,如果相关性比较大,则认为它们之间的沙尘暴出现存在一定的影响(可能是由于地理位置较接近、气流走势等因素的结果),那么这类观测点就不能简单的单独分析,而也应该考虑到相关点的影响。

(2)对问题二的分析

应该注意到:1)属于问题一中哪一类型地区;2)某个观测点和周边邻近的几个观测点的相关系数以及它们各自的沙尘暴发生概率;3)与问题一中重要沙尘源的地理位置关系。

二、模型的假设

(1)处在同一地区的观测站的地形地貌等外部条件基本相同;(2)假定沙尘暴发生可能性大小与月平均风速、月大风发生、月平均气温、月降水量、月平均相对湿度、太阳辐射六个因素有关;(3)沙尘暴的产生的三大支配因子:1)强风因子,2)热力动力不稳定因子,3)沙尘源因子都可以在上述因素中得以体现。

三、符号说明

K 干燥指数	AEW	月大风日数的月均值,取为 EEW/30
E 最大蒸发量	T	月平均气温
RF 月降水量	RE	月蒸发量
ARF 月降水量的日均值,取为 RF/30	ARE	月蒸发量的日均值,取为 RE/30
P 平均年降水量	HU	月相对湿度
Z 干燥度	D	月沙尘暴天数
Q _{ir} 直接辐射	DB	直接辐射,一人中形成沙尘暴与行,是为1,否为0
Q _{sr} 散射辐射	P _(DB=1)	一天中形成沙尘暴的可能性
Q _{rf} 反射辐射	S	沙尘暴危险系数
σ 斯蒂芬-波尔兹曼常数 (4.903*10 ⁻³ MJ·K ⁻⁴ ·m ⁻²)	S ^D	标准沙尘危险系数
a _i 、b _i 经验常数	F _i	评判标准(i=1,2,3,4)
N 可照时数(h)	V	影响范围影响系数
n 实际日照数(h)	E _i	沙尘暴发生危险指数
E _g 地表状况批判指标	E _i [*]	综合邻近观测点沙尘暴发生危险指数
SW 月平均风速	EW	月大风日数

收稿日期:2008-04-08

作者简介:马桢干(1987-),男,湖北黄石人,本科生,从事国际经济与贸易研究;陈奕山(1986-),男,广东潮州人,本科生,从事农业经济研究;伍骏骞(1986-),男,四川自贡人,本科生,从事农业经济研究(第一届“数学中国”杯建模大赛一等奖作品编成版)。

四、模型建立与求解

(一) 对问题一的研究

1. 基于沙尘动力学机理的沙尘天气等级评估模型的建立
从物理机理角度分析沙尘暴的形成过程,首先确定沙尘暴的形成必须具备的条件。

(1) 沙尘暴形成原因分析

沙尘暴的形成必须具备四个条件:一是地面上丰富的沙尘源;二是强劲的风力,这是沙尘暴形成的动力基础;三是不稳定的空气状态;四是干旱的气候环境。

(2) 从沙尘动力学机理分析沙尘暴形成重要影响因素

各种气象指标如月平均风速、大风发生日数、月平均气温、总辐射、月平均降水、月蒸发量、相对湿度等均是影响空气稳定性的因素。需要进一步研究这些气象指标怎样通过干燥系数、辐射指标、空气稳定性三者影响沙尘暴的形成过程的,即研究它们在物理机理上的联系。

地质情况→干燥度K	$\left\{ \begin{array}{l} 10^{\circ}\text{C以上积温} \\ 10^{\circ}\text{以上同期降水量} \end{array} \right.$
空气流不稳定→Richardson 不稳定系数	$\left\{ \begin{array}{l} \text{起沙} \rightarrow \text{动力不稳定} \left(\frac{\partial SW}{\partial t} \right) \\ \text{扬沙} \rightarrow \text{静力不稳定} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \end{array} \right.$
地表植被→辐射环境要素	$\left\{ \begin{array}{l} \text{散射辐射 } Q_{\alpha} \\ \text{直接辐射 } Q_{\alpha} \end{array} \right.$
重要沙尘源的判断——“星座”图聚类分析法	
大风走向——沙尘暴的动力基础(长距离远输的保证)	

(3) 沙尘暴形成机理的分析

沙尘暴产生的大气边界层是极其不稳定的(包括静力和动力不稳定),湍流发展旺盛。根据产生沙尘暴的天气学动力学概念,我们可以用起沙和扬沙两种机制来概括其产生。

根据不同的指标对中国西北观测点进行分类:

(4) 地质判断: 干旱区、湿润区、半湿润区的划分

干燥指数 K 值法

干燥度是衡量一个地区气候干湿度的指标,其值愈大气候愈干燥,它是判断一个地点是否会发生沙尘暴的重要数值。中国科学院考虑农牧业分布界限问题、热带经济作物栽培问题时,采用热量与水分两项指标计算:

$$K = \frac{E}{RF} = \frac{0.16 \sum T (\geq 10^{\circ}\text{C 稳定期})}{\sum RF (\geq 10^{\circ}\text{C 期内})} \quad <1>$$

式中 K 为干燥指数,E 为可能最大蒸发量,是用 $\geq 10^{\circ}$

稳定期中的 $\geq 10^{\circ}$ 积温 ($\sum T (\geq 10^{\circ}\text{C 稳定期})$) 乘以 0.16 经验系数;RF 为降雨量 ($\geq 10^{\circ}\text{C 稳定期内}$)。它们分别是 10° 以上积温和同期(注意时间单位)降水量,表示可能蒸散量与降水量之比。它表示一地气候的干湿状况,常用于农业气候区划和生态区划。通常干燥度小于 1.00 属于气候湿润地区,1.00 ~ 1.49 属于半湿润地区,1.50 ~ 3.49 属于半干旱地区,3.50 以上属于干旱地区。

(5) 对空气稳定度的分析

Richardson 不稳定系数^[1]

根据沙尘暴产生的天气学概念模型,可以用起沙和扬沙两种机制来概括其产生,同时沙尘暴是冷空气在移动过程中出现的一种强烈锋生过程,并且沙尘暴产生的大气边界层是极其不稳定的(包括静力和动力不稳定),湍流发展旺盛。

1) 起沙: 说明边界层内必有较强的风速垂直切变存在(动力不稳定),并可用 $\frac{\partial SW}{\partial t}$ 表示;

2) 扬沙: 说明边界层必然存在浮力上升运动(静力不稳定),并可用 $\frac{\partial T}{\partial t}$ 表示。

再把垂直动量锋生(即风速垂直切变加大)和垂直温度锋生(即大气层结趋于更加不稳定)结合起来考虑,就形成我们用物理学中常用来判定一个行星边界层稳定性大小的一个重要参数——梯度 Richardson 数(简写为 Ri)来表征大气的稳定性。

Ri 定义如下:

$$Ri = \frac{\frac{g}{T_v} \frac{\partial T_v}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial SW}{\partial z} \right)^2} \quad <2>$$

式中 $T_v = (1+0.0608q)T$ 为虚位温。为了便于模式计算, $\Delta T_v / \Delta z$ 分别用近似 $\partial T_v / \partial z$, 用 $\Delta u / \Delta z$ 去近似 $\partial u / \partial z$, 那么就能确定一个叫做总体 Richardson 数 Ri_b 的新比值:

$$Ri_b = \frac{g \Delta T_v \Delta Z}{T_v \left[\left(\Delta u \right)^2 + \left(\Delta SW \right)^2 \right]} \quad <3>$$

上式应用到模式最底层,有:

$$Ri_b = \frac{g z_a (T_{v_a} - T_{v_b})}{T_a SW^2} \quad <4>$$

其中 $SW = (SW_a + SW_b)^{\frac{1}{2}}$, SW_a 是模式最低位面 Z_a 上的风速, SW_b 是一个对流速度,并由下式确定:

$$SW_b = 2(T_s - T_a)^{\frac{1}{2}} \quad <5>$$

T_s 和 T_a 分别为 Z_a 和地面上的位温, T_{v_a} 和 R_m 分别为 Z_a 和地面上的虚位温。

Richardson 数值为负数时,表示的是静力和动力不稳定气流,这种气流肯定有湍流发生,此种情况最有利于沙尘暴的发生,更具体一点来说,就是最有利于沙尘上扬到高空。

(6) 辐射环境要素的空间化信息

太阳辐射式地球上所以生物得以生存和繁衍的最基本的能源源泉,生态系统内部的平衡状态是建立在能量平衡基础上的。

因此,我们有理由认为太阳辐射与地表植被的生长情况有着必然的联系。

题目给出的辐射数据有五个: 总辐射 $Q_{\text{radiation}}$ 、净全辐射 R_n 、散射辐射 Q_{α} 、直接辐射 Q_{α} 、反射辐射 Q_{refl} 。

$$\text{Penman 修正式模型: } R_n = 0.75 R_{\alpha} \left(\alpha + b \cdot \frac{n}{N} \right) - \sigma T_k^4 \cdot (0.56 - 0.079 \sqrt{e_{\alpha}}) \cdot (0.1 + 0.9 \frac{n}{N}) \quad <6>$$

式中, R_n 为地表净辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); R_{α} 为天文辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数 $4.903 \times 10^{-7} \text{ MJ} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2}$; T_k 为平均气温(K); e_{α} 为实际水气压(hpa); n 为实际日照数(h), N 为可照时数(h), 其比值为日照百分率; a_{α}, b_{α} 为经验常数, 取 $a_{\alpha}=0.18, b_{\alpha}=0.55$ 。

我们取太阳总辐射 Q_{α} 代替天文辐射 R_{α} , 由于 12 个有效辐射观测点的纬度位置相似, 接受太阳光的照射时间接近, 因此, 我们认为日照百分率 $\frac{n}{N}$ 相同。

$$R_n = 0.75Q_{\alpha}(\alpha + b_n \frac{n}{N}) - \sigma T_k^4 (0.56 - 0.079 \sqrt{e_{\alpha}}) \cdot (0.1 + 0.9 \frac{n}{N})$$

<7>

2. 对各个省进行区域的划分和参数估计

(1) 根据 Richardson 不稳定系数的新比值 R_{ib} 和干燥度 K 两个指标, 将题目中的 187 个观测点划分为四个区域:

- | | |
|----------------------------|--|
| 参考
E _p
缩放 | 1、 $R_{ib} < 0$, 且 $K > 3.5$, 即为危险区(强迫对流不稳定, 干旱) |
| | 2、 $R_{ib} < 0$, 且 $3.5 \geq K > 1.5$, 即为警报区(强迫对流不稳定, 半干旱) |
| | 3、 $R_{ib} > 0$, 且 $K > 3.5$, 即为防御区(自由对流不稳定, 干旱) |
| | 4、其他, 为一般区 $R_{ib} < 0$ |

(2) 综合地表状况指标 E_p , 将观测站点划分为四个区域: 危险区、警报区、防御区、普通区。

3.“星座”图聚类法对沙尘源确定的应用

聚类分析是研究“物以类聚”规律的一种多元统计方法, 以观测数据的样本为对象, 根据一定的准则, 研究其是否可以分类, 分为几类的问题。它是通过样品的相似、相近或相互关联来分类的。我们需要找出哪些观测站点在沙尘暴发生频数上的相互关联, 即对这些站点进行分类, 聚类分析是一种合理的选择。

(1) 灰色关联分析法

1) 原始数据变换: 对原始数据进行初值化处理, 并求差序列 $\Delta_{\alpha}(k)$ 及两级差最大差 Δ_{\max} 与最小差 Δ_{\min} , 一般取 $\Delta_{\min}=0$ 。

原始数据 $y(i)=(y_i(1), y_i(2), y_i(3), \dots, y_i(n)) (i=0, 1, \dots, m)$

初值化得: $x_i = (\frac{y_i(1)}{y_i(1)}, \frac{y_i(2)}{y_i(1)}, \frac{y_i(3)}{y_i(1)}, \dots, \frac{y_i(n)}{y_i(1)}) = (x_i(1), x_i(2),$

$x_i(3), \dots, x_i(n)) (i=0, 1, \dots, m)$

$\Delta_{\alpha}(k) = |x_0(k) - x_i(k)| (i=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n)$

2) 计算相关系数

$$\xi_{\alpha}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \Delta_{\max}}{\Delta_{\alpha(k)} + \rho \Delta_{\max}}, (1 < \rho < 1, \text{本文取 } \rho = 1) \quad <9>$$

$$3) \text{求关联度 } r_{\alpha}: r_{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{\alpha}(k) (i=1, 2, \dots, m) \quad <10>$$

4) 列关联矩阵

5) 优势分析: 根据各行或各列关联度的大小判断主要影响因素即优势因素和次要影响因素。

在以上方法下进行计算, 由于由各省数据分别计算得出的各变量权重向量差异不大, 本文选取各省权重向量的均值作为最终用以考虑“星座”划分的权重。即:

(2) “星座”图聚类法

运用“星座”图聚类法对各地气候进行区域划分。“星座”图聚类的基本原理是: 将每个样点按一定的数量关系画在一个圆之中, 每一个样点用一个星点表示, 同类的样点便可以组成一个“星座”, 然后归类并区分不同“星座”的界线, 从而得到一个星座类型图。在本研究中即以各气象因子为参考数

平均风速	大风日数	平均温度	降雨量	蒸发量	相对湿度
0.163315	0.173595	0.16972	0.151772	0.16154	0.180066

列, 将每个地点作为一个样点, 点在半圆坐标中组成“星座”, 具体步骤如下。

首先, 对沙尘暴附件附带观测数据进行极差标准化处理, 按下式: $\Phi_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \times \pi \quad <11>$

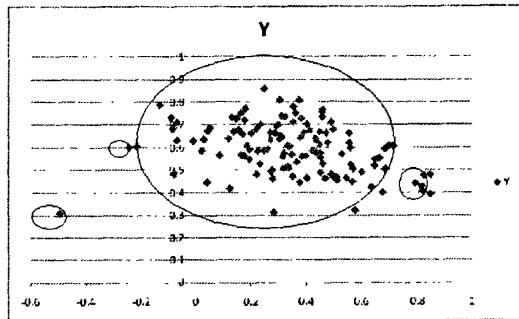
式中 $i=1, 2, 3, \dots, n$, 为样点数(在此表示每一个地点); $j=1, 2, 3, \dots, p$, 为指标数(在此表示各气象因子); x_{ij} 为原始数据; $x_{j\max}, x_{j\min}$ 分别为第 j 个因子的最大值和最小值; Φ_{ij} 为标准化后的数据。

然后, 在以上基础上按下列各式计算各样点的坐标值、

$$\begin{aligned} \text{综合指标值: } x_i &= \sum_{j=1}^p w_j \cos \phi_{ij}, Y_i = \sum_{j=1}^p w_j \sin \phi_{ij}, Z_i = \sum_{j=1}^p \phi_{ij} w_j \\ (0 \leq w_j \leq 1, \text{且} \sum_{j=1}^p w_j = 1) \end{aligned} \quad <12>$$

式中 X_i 为第 i 个样点的横坐标; Y_i 为第 i 个样点的纵坐标; w_j 为第 j 个指标的权重值; Z_i 为第 i 个样点的综合指标值。

再根据 X_i, Y_i 的值确定每个样点在图内的星点位置, 并依次作出反应全部样点位置的星点, 性质相似和接近的样点代表星点聚在一起形成一个星座型图。本文计算后所得的星座图如下:



(3) 结果与分析

1) 各气象因子的关联分析

将原始数据处理后, 运用灰关联分析方法分别计算各气象因素间的关联度, 并列成可关联矩阵。本文分别对内蒙古、青海、新疆、宁夏、甘肃各省的观测数据进行了气象因子关联分析, 采用的观测数据是各省 1985—2005 年的观测数据。

2) 对沙尘源的确定

由“星座”图聚类法我们可以以沙尘暴发生与传输的实际过程为原则分析出沙尘源的大致位置。分析的原则和结果如下:

a. 临近站点若没有被分为一类, 则认为很大原因是它们受到了不同沙源的影响。

b. 若同一类站点在并不相邻或在同一地区, 而在某一条线路上, 则认为它们可能受到同一个沙源的影响, 而且它们分布在该沙源沙尘暴的移动路径上, 于是可以认为它们的两端可能存在沙源。

c. 若相邻或位于同一地区的站点正好都被分为一类, 则认为它们受到同一沙尘源的影响, 而且极有可能沙源就在附近。

4. 沙尘源影响范围模型(Logistic 模型)

(1) 影响范围标准的分析

沙尘源的影响范围主要是两方面的因素评判:

一方面由沙尘源本身的威力决定, 这一点可以由观测点发生沙尘暴的可能性大小决定;

另一方面观测点之间的相关性大小决定：与其他观测点间相关性的大小(越大认为影响范围越大)。

(2) Logistic 模型对发生沙尘暴的可能性评判

这部分是对数据的计量分析，试图从对已有数据的分析中找出影响沙尘暴形成的关键因素，之后，根据关键因素对沙尘暴未来可能形成与否的状况作出大致的判断，并且，在关键因素(题中的气候指标)之后对数值进行区间划分，在划分的基础上形成沙尘暴的分级。

模型假设

一天中形成沙尘暴的可能性是变量 SW, AEW, ARF, ARE, HU 的分布函数，列出以下函数假设：

$$P_{(DB=1)} = \frac{1}{1+e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 * SW + \alpha_2 * AEW + \alpha_3 * ARF + \alpha_4 * ARE + \alpha_5 * HU)}} \quad <13>$$

需要指出，以上六个变量对发生沙尘暴可能性的影响大小在不同地区将会不同。在对不同沙尘暴发生区域进行划分后，分别在各个地区中选取一两个观测点的观测数据进行回归估计，之后剔除估计结果显著性不足的变量。这样确立的沙尘暴发生概率估计模型在所划分的不同区域中不同。

(3) 沙尘暴影响范围的评判(相关分析模型)

分析各个省内同等级区域的观测点的观测数据是否具有相关性，如果相关性比较大，则认为它们之间的沙尘暴出现存在一定的影响(可能是由于地理位置较接近、气流走势等因素的结果)，那么这类观测点就不能简单的单独分析，而也应该考虑到相关点的影响。

1)两个观测点之间的相关性分析：

X, Y 的协方差: $\text{COV}(X,Y) = E(X-E(X))(Y-E(Y)) - E(XY) - E(X)E(Y)$ $<14>$

$$X, Y \text{ 的相关系数: } r_{XY} = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sqrt{DX} \cdot \sqrt{DY}} \quad <15>$$

$$\text{即 } r_{XY} = \frac{\sum (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad <16>$$

其中， X_i 是在特定的年月观测点对应的沙尘暴发生天数， \bar{X} 是观测点所有年月的沙尘暴发生天数平均值， Y_i 是在特定的年月另一观测点对应的沙尘暴发生天数， \bar{Y} 是其所有年月的沙尘暴发生天数平均值。

参考文献：

- [1] 杨德保.沙尘暴[M].北京:气象出版社,2003.
- [2] 于贵瑞,何洪林.中国陆地生态系统空间化信息研究图集[M].北京:气象出版社, 2004.
- [3] 寿绍文,励申申,姚秀萍.中尺度气象学[M].北京:气象出版社, 2003.
- [4] 彭继平,李钢铁.我国沙尘暴灾害特点及原因分析[J].干旱区资源与环境, 2008,(2).
- [5] 王涛,陈广庭,钱正安.中国北方沙尘暴现状及对策[J].中国沙漠, 2001,(4).
- [6] 庞皓.计量经济学[M].北京:科学出版社, 2007.
- [7] 周元春,柳旭.沙尘暴地理不可或缺的部分[J].中国国家地理, 2003,(4).
- [8] 王蔚.沙尘暴面面观[J].中国国家地理, 2003,(4):44-52.
- [9] 张海霞,尤凤春,周伟灿.强沙尘暴天气形成机制个例分析[J].气象科技, 2007,(2).
- [10] 钱正安,蔡英,刘景涛.中蒙地区沙尘暴研究的若干进展[J].地球物理学报, 2006,(1).

2)进行循环运算，计算出所有的观测点之间的相关性系数：

3) 对相关系数进行检验，看观测点之间是否有内在联系。

(二)对问题二的研究

1.对预报指标系统的分析

对引起沙尘暴发生、发展的气候背景和天气成因建立适用于业务应用的预报指标系统。可根据需要选取不同的数据，但需要考虑数据的易获得性和模型的健壮性(Robustness)。

我们应该注意到的是：1)属于问题一中观测点分类中哪一类型地区；2)同时考虑这个观测点和周边邻近的几个观测点的相关系数，以及它们各自的沙尘暴发生概率，综合判断沙尘暴危险系数；3)与问题一中重要沙尘源(同时考虑到沙尘源的强弱)的地理位置关系。根据以上，判断出危险等级并进行相应的预报警告。

2.预报指标系统的建立

1)根据所给的数据计算出 Richardson 不稳定系数、干燥度 K，我们可以得到对应观测点的不稳定程度，同时联系问题一中数理统计得出的沙尘暴发生可能性 $P_{(DB=1)}$ ，综合得出危险指数 E_i ：

$$E_i = \frac{P_{(DB=1)} * K + (1 - P_{(DB=1)}) * R_i}{\sqrt{P_{(DB=1)} * (1 - P_{(DB=1)})}} \left[\frac{\ln(P_{(DB=1)} + \sqrt{K^2 + R_i^2})}{1 + P_{(DB=1)}} \right] \quad <17>$$

计算准备预测观测点危险指数 E_i 与邻近观测点危险指数 $E_j(N_i \text{ 个})$

得出 $N_i + 1$ 个观测点的危险指数 $E_i = (N_i + 1)$

2)依次计算准备预测观测点与其余 N_i 个邻近观测点的相关系数

$$r_{XY_{N_i}} = \frac{\sum (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y}_{N_i})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum (Y_i - \bar{Y}_{N_i})^2}} \quad <18>$$

3)观测点综合危险指数 E_i^*

$$E_i^* = \sum \alpha \cdot E_i(n) \cdot r_{XY_{N_i}} \quad <19>$$

其中， α 为权重，由两观测点之间的地理关系(远近、地势)和大气因素(环流、风的方向和大小)。

[责任编辑 安世友]