

腾格里沙漠东南缘沙尘暴变化趋势的 Markov 模型分析

屈建军,孙宏义,李金贵

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所,甘肃 兰州 730000)

摘要:从概率的角度出发,应用 Markov 模型分析了腾格里沙漠东南缘近 20 a 来沙尘暴变化趋势,结果显示:① 2000 年发生的强沙尘暴和特强沙尘暴的概率各为 0.5,而事实上 2000 年发生沙尘暴 11 次,接近预测结果。② 2000 年发生伴随降雨的特强沙尘暴概率为 0.25,不伴随降雨的沙尘暴概率为 0.5,这和 2000 年中国北方干旱,很少发生伴随降雨的沙尘暴的事实一致。③ 随着时间序列的延长,Markov 模型可成为预测沙尘暴发生的一条有效途径。

关键词:沙尘暴;趋势;Markov 模型;腾格里沙漠

中图分类号:P445.4

文献标识码:A

近年来关于沙尘暴变化趋势的研究,一是从决定论的动力学思想出发,通过数值模拟研究沙尘暴发生发展的规律,二是从统计力学的角度出发,通过不确定性的程度研究沙尘暴发生发展的规律^[1,2]。Markov 模型的数据采集运用了统计力学的方法,模型的预测过程依据的理论是转移概率仅与现在的状态有关,而与过去的各个状态无关^[13]。本文分析了沙坡头沙尘暴发生的时间序列,构造了 Markov 模型,对沙坡头地区沙尘暴的变化趋势作了预测,进而对人们关心的伴随降雨的沙尘暴事件作了相应的分析。

1 建模基本思路

1.1 基本模型

考虑一个具有 m 个状态(即 $1, 2, \dots, m$)的系统,状态的变化只发生在参数的离散值上。例如,在时刻 t_1, t_2, \dots, t_n 。令 X_{n+1} 表示在 t_{n+1} 时的系统状态。一般说来,系统将来处于状态 i 的概率与它的全部历史有关,所以应该用条件概率

$$P(X_{n+1} = i | X_0 = x_0, X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n) \quad (1)$$

表示。其中 $X_0 = x_0, \dots, X_n = x_n$ 代表系统以前所有的状态。如果将来的状态只与现在的状态有关,条件概率(1)变为

$$P(X_{n+1} = i | X_0 = x_0, X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n) = P(X_{n+1} = i | X_n = x_n) \quad (2)$$

这样的过程称为 Markov 链。

对 Markov 链,可以将从时刻 t_m 的状态 i 变为时刻 t_n 的状态 j 的条件概率表示为

$$p_{ij}(m, n) = P(X_n = j | X_m = i), n > m \quad (3)$$

如果 $p_{ij}(m, n)$ 只与时间差 $t_n - t_m$ 有关,则称该 Markov 链为齐次的。此时,定义

$$p_{ij}(k) = P(X_k = j | X_0 = i) = P(X = j | X_s = i), s \geq 0 \quad (4)$$

为 k 步转移概率。因此对一个具有 m 个状态的系统,可以将各种情况的转移概率归纳为一个矩阵,称该矩阵为转移概率矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mm} \end{bmatrix}$$

转移概率矩阵的确定是应用 Markov 模型的关键,一般要根据实际问题的统计资料分析得出。

1.2 状态概率

对齐次 Markov 链,设系统的初始状态可以由行矩阵表示:

$$P_{(0)} = [p_{(0)1}, p_{(0)2}, \dots, p_{(0)m}]$$

式中 $p_{(0)i}$ 是系统最初处于状态 i 的概率。在特殊情形下,系统的初始状态已知为 i ,则 $p_{(0)i} = 1.0$,而行矩阵 $P_{(0)}$ 内的其它元素均为零。经一步转移之

收稿日期:2000-11-29;改回日期:2001-03-23

基金项目:中国科学院资源环境领域知识创新工程重大项目(KZCX2100015),国家自然科学基金(49971013)资助

作者简介:屈建军(1959—),男(汉族),陕西高陵人,研究员,硕士生导师,主要从事风沙物理与风沙地貌研究工作。

后 ,系统处于状态 j 的概率由全概率公式给出 :

$$p_{k(1)} = P(x_1 = j) = \sum P(X_0 = i)P(x_1 = j | X_0 = i)$$

亦即

$$p_{k(1)} = \sum p_i(0)p_{ij}$$

故可用矩阵表示为

$$P(1) = P(0)P \tag{5}$$

类似地 ,经过两步转移之后 ,系统处于状态 j 的概率为

$$P(2) = P(1)P = P(0)PP = P(0)P^2 \tag{6}$$

同理可以证明 ,经过 n 步转移之后 ,系统状态概率

表 1 沙坡头沙尘暴资料统计及分级

Tab.1 Sand \ storm date statistics and classification in Shapotu area

年度	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
次数	9	8	11	12	8	7	5	5	7	2	8	8	9	9	5	8	9	6	6	11
分级	B	B	A	A	B	C	D	D	C	D	B	B	B	B	D	B	B	C	C	A

2.2 转移概率矩阵的分析获取

在 20 a 中 ,特强年 A 共发生 2 a (A 共发生 3 a ,由于 A 后没有下一年 ,故计数为 2 a),下一年是 A 的为 1 a ,转移概率为 1/2 ,下一年是 B 的为 1 a ,转移概率为 1/2 ,下一年是 C、D 的为 0 a ,转移概率分别为 0 ;在 20 a 中 ,强烈年 B 共发生 9 a ,下一年是 A 的为 1 a ,转移概率为 1/9 ,下一年是 B 的为 5 a ,转移概率为 5/9 ,下一年是 C 的为 2 a ,转移概率为 2/9 ,下一年是 D 的为 1 a ,转移概率 1/9 ;在 20 a 中 ,平常年 C 共发生 4 a ,下一年是 A 的为 1 a ,转移概率为 1/4 ,下一年是 B 的为 0 a ,转移概率为 0 ,下一年是 C 的为 1 a ,转移概率为 1/4 ,下一年是 D 的为 2 a ,转移概率 2/4 ;在 20 a 中 ,少发年 D 共发生 4 a ,下一年是 A 的为 0 a ,转移概率为 0 ,下一年是 B 的为 2 a ,转移概率为 2/4 ,下一年是 C 的为 1 a ,转移概率为 1/4 ,下一年是 D 的为 1 a ,转移概率 1/4。至此 ,转移概率矩阵如下 :

$$P(0) = \begin{bmatrix} & A & B & C & D \\ A & 1/2 & 1/2 & 0 & 0 \\ B & 1/9 & 5/9 & 2/9 & 1/9 \\ C & 1/4 & 0 & 1/4 & 2/4 \\ D & 0 & 2/4 & 1/4 & 1/4 \end{bmatrix}$$

2.3 预测 2000 年的沙尘暴强度

1999 年是沙尘暴发生的强烈年 ,故 $P(1) = [$

为

$$P(n) = P(n-1)P = P(n-2)PP = \dots = P(0)Pn \tag{7}$$

由此可见 ,系统在任何时刻的状态概率是由初始状态概率和转移概率确定的。

2 结果与讨论

2.1 数据的统计和分级

统计 1980—1999 年 20 a 间沙坡头沙尘暴发生的时间序列如表 1 所示 ,根据经验对其进行分级 ,每年沙尘暴发生次数 ≥ 10 次为特强年 ,用 A 表示 ;9 次、8 次为强烈年 ,用 B 表示 ;7 次、6 次为平常年 ,用 C 表示 ; ≤ 5 次为少发年 ,用 D 表示。

1 0 0 0] ,应用公式 (5) 预测 2000 年沙尘暴发生强度的概率为 :

$$P(1) = P(0)P = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 0 & 0 \\ 1/9 & 5/9 & 2/9 & 1/9 \\ 1/4 & 0 & 1/4 & 2/4 \\ 0 & 2/4 & 1/4 & 1/4 \end{bmatrix}$$
$$P(1) = [1/2 \ 1/2 \ 0 \ 0]$$

即 2000 年不是发生强沙尘暴就是特强沙尘暴 ,它们的概率各为 0.5 ,而事实上 2000 年发生沙尘暴 11 次 ,属特强沙尘暴 ,这和预测的结果接近。

3 伴随降雨的沙尘暴

3.1 数据的统计和分级

统计 1980—1999 年 20 a 间沙坡头沙尘暴发生伴随降雨的时间序列如表 2 所示 ,根据经验对其进行分级 ,每年沙尘暴发生次数 ≥ 4 次为特强年 ,用 A 表示 ;3 次为强烈年 ,用 B 表示 ;2 次为平常年 ,用 C 表示 ; ≤ 1 次为少发年 ,用 D 表示。

3.2 转移概率矩阵的分析获取

用同样的方法获取初步转移概率矩阵 :

$$P(0) = \begin{bmatrix} & A & B & C & D \\ A & 1/4 & 0 & 1/4 & 2/4 \\ B & 0 & 0 & 0 & 1 \\ C & 1/6 & 0 & 4/6 & 1/6 \\ D & 2/7 & 2/7 & 1/7 & 2/7 \end{bmatrix}$$

表 2 沙坡头伴随降雨的沙尘暴资料统计及分级

Tbl.2 Date statistics and classification of sand-storm accompanied with rain in Shapotu area

年	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
次数	4	4	2	4	1	1	3	0	3	0	1	4	1	2	2	2	2	2	0	4
分级	A	A	C	A	D	D	B	D	B	D	D	A	D	C	C	C	C	C	D	A

3.3 预测 2000 年伴随降雨的沙尘暴强度

1999 年是伴随降雨的沙尘暴发生的强烈年 ,故 $P(1) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$,应用公式(5)预测 2000 年伴随降雨的沙尘暴发生强度的概率为 :

$$P(1) = P(0)P =$$

$$[1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} 1/4 & 0 & 1/4 & 2/4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1/6 & 0 & 4/6 & 1/6 \\ 2/7 & 2/7 & 1/7 & 2/7 \end{bmatrix}$$

$$P(1) = [0.25 \ 0 \ 0.25 \ 0.5]$$

即 2000 年发生伴随降雨的特强沙尘暴概率为 0.25 ,发生拌随降雨的强沙尘暴概率为 0 ,发生平常年份的沙尘暴的概率为 0.25 ,不伴随降雨的沙尘暴概率为 0.5 ,而事实上 2000 年中国北方干旱 ,很少发生伴随降雨的沙尘暴 ,这和预测的结果接近。

4 结论

本文通过腾格里沙漠东南缘近 20 a 来沙尘暴变化趋势 ,应用 Markov 模型进行了分析 ,结果显示 : (1)研究发现 2000 年发生的强沙尘暴和特强沙尘暴的概率各为 0.5 ,而事实上 2000 年发生沙尘暴 11 次 ,接近预测结果。

(2)2000 年发生拌随降雨的特强沙尘暴概率为 0.25 ,不伴随降雨的沙尘暴概率为 0.5 ,这和 2000 年中国北方干旱 ,很少发生拌随降雨的沙尘暴的事实一致。

(3)随着时间序列的延长 ,Markov 模型可能成为预测沙尘暴发生的一条有效途径。

参考文献 (References) :

[1] 陈伟民 ,王强 ,牛志敏 ,等 .中国西北部 "4.5"沙尘暴过程中尺度低压的数值模拟[J].中国沙漠 ,1996 ,16(2) :140-144.

[2] 申绍华 ,陈受均 .沙尘辐射强迫峰生过程的数值模拟[J].气象学报 ,1993 ,51(3) :283-294.

[3] 王式功 ,杨德保 ,周玉素 ,等 .我国西北地区 "94.4"沙尘暴成因的探讨[J].中国沙漠 ,1995 ,15(4) :332-338.

[4] 徐国昌 .甘肃 "4.22"特大沙尘暴分析[J].气象学报 ,1979 ,37(4) :26-35.

[5] Brazel A J. The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona (1965-1980) [J]. *Journal of Climatology* ,1986 ,6 :255-275.

[6] 胡隐樵 ,光田宇 .强沙尘暴发展与干跑线-黑风暴形成的一个机理分析[J].高原气象 ,1996 ,15(2) :178-185.

[7] 王式功 ,董光荣 ,杨德保 ,等 .中国北方地区沙尘暴灾害及防治[J].自然灾害学报 ,1996 ,5(2) :86-94.

[8] David S G Thomas. Desert dust [J]. *Arid Zone Geomorphology* , John Wiley & Sons Ltd. 1993 ,3 :210-215.

[9] 夏训诚 ,杨根生 ,等 .中国西北地区沙尘暴灾害及防治[M].北京 :中国环境科学出版社 ,1996.5-12

[10] 赵兴梁 .甘肃特大沙尘暴的危害与对策[J].中国沙漠 ,1993 ,13(3) :1-7.

[11] 王式功 ,杨德保 ,金炯 ,等 .我国西北地区黑风暴的成因和对策[J].中国沙漠 ,1995 ,15(1) :19-30.

[12] 付有智 ,刘坤训 ,丁荣 ,等 .甘肃黑风成因及预报[J].气象 ,1994 ,20(20) :50-53.

[13] 黄克中 ,毛善培 .随机方法和模糊数学应用[M].同济大学出版社 ,1987.182-203.

Analyses on the Variation Trend of Sand-dust Storms with Markov Model in Southeastern Tengger Desert

QU Jian-jun , SUN Hong-yi , LI Jin-gui

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China)

Abstract : From the angle of probability , the Markov Model has been applied to analyze the variation trend of sand-dust storms occurred in the southeastern Tengger Desert during the recent 20 years . The results show that the probabilities of the strong and the extreme-strong sand-dust storms should be 0.5 individually in 2000 , which is near the actually happened times of 11 in this year . In 2000 , the probability of the extreme-strong sand-dust storms accompanied with precipitation was 0.25 , while that of without precipitation was 0.5 , which was in accordance with the fact that few sand-dust storms with precipitation happened in dry northern China in this year . If the time-series are long enough the Markov Model can be effectively used to predicting the happening of the sand-dust storms .

Key words : sand-dust storm ; trend ; Markov Model ; Tengger Desert

\ =

※

※

※

※

※



青藏高原沙漠化问题与持续发展

著者 : 李 森 董玉祥 董光荣 等

专业 : 自然地理学

定价 : 18 元

开本 : 32 开

ISBN : 7-80057-437-7/Z·242

出版日期 : 2001 年 3 月

出版 : 中国藏学出版社

地址 : 北京亚运村北四环东路 131 号 邮编 100101

本书共分八章。第一章 , 青藏高原自然环境背景与社会经济概况 ; 第二章 , 青藏高原沙漠化土地分布、分区与发展态势评价 ; 第三章 , 青藏高原沙地与沙漠化的形成时代和演化过程 ; 第四章 , 青藏高原现代沙漠化的成因与发展趋势 ; 第五章 , 青藏高原沙漠化对环境与发展的危害和压力 ; 第六章 , 青藏高原实现可持续发展的沙漠化防治战略与对策 ; 第七章 , 青藏高原沙漠化防治的总体布局与区域综合治理 ; 第八章 , 青藏高原沙漠化土地治理与开发的范例。