

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 蒙古高原环境与工程研究所, 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^[3]。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

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

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:

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

式中 $p_{i(0)}$ 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 $P_{i(0)} = 1.0$, 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:

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

亦即

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

故可用矩阵表示为

$$P(1) = P(0)P \quad (5)$$

类似地,经过两步转移之后,系统处于状态 j 的概率为

$$P(2) = P(1)P = P(0)PP = P(0)P^2 \quad (6)$$

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

$$P(n) = P(n-1)P = P(n-2)PP = \dots = P(0)P^n \quad (7)$$

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。

表 1 沙坡头沙尘暴资料统计及分级

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

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

$$P(1) = [1/2 \ 1/2 \ 0 \ 0]$$

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 | 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:

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

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

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

即 2000 年发生伴随降雨的特强沙尘暴概率为 0.25,发生伴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.强沙尘暴发展与干飑线-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。