

气象水文应用

马尔科夫链统计模拟

*Application of Markov Chain Statistic Simulation
in Meteorology and Hydrology*

丁裕国 刘吉峰 王冀 著

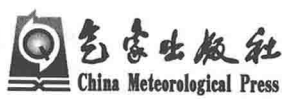


气象出版社

China Meteorological Press

气象水文应用马尔科夫链统计模拟

丁裕国 刘吉峰 王 冀 著



内容简介

本书从 Markov 链理论出发,探讨应用随机模拟方法建立各种统计或动力模式,并应用于大气和水文学领域。全书共分三篇 7 章:第一篇为基础篇,叙述 Markov 过程与隐式 Markov 过程的基本理论、基于 Markov 理论的随机模拟方法与时空降尺度技术;第二篇为应用篇,介绍基于 Markov 链的天气气候变量的随机模拟技术方法;第三篇则是前沿篇,重点涉及 Markov 过程与复杂气候系统问题、气候系统的不确定性及其他一些问题。

本书可作为大气科学、水利工程、地球科学类研究生教材,也可以作为相关专业教师、本科生及科技工作者参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

气象水文应用马尔科夫链统计模拟/丁裕国,刘吉峰,王冀著.

北京:气象出版社,2014.12

ISBN 978-7-5029-6079-7

I. ①气… II. ①丁… ②刘… ③王… III. ①马尔柯夫链-应用-水文气象学 IV. ①P339

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 301348 号

Qixiang Shuiwen Yingyong Maerkefulian Tongji Moni

气象水文应用马尔科夫链统计模拟

丁裕国 刘吉峰 王 冀 著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址: <http://www.qxcbs.com>

责任编辑:蔺学东

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:335 千字

版 次:2015 年 6 月第 1 版

定 价:72.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:陈凤贵

责任技编:吴庭芳

印 张:13

印 次:2015 年 6 月第 1 次印刷

序 言

近年来,丁裕国教授等人克服种种困难,以顽强的毅力写成这本专著。谨向作者表示衷心的祝贺!

丁裕国教授早年师从我国统计气象奠基人么枕生教授。20世纪80年代,他花了近10年时间完成了么枕生教授《气候统计》专著(1963年版,30万字)的扩编工作,出版了75万字的《气候统计》(修订本),该书出版后,受到各界好评。

近50年来,丁教授在南京信息工程大学(原南京气象学院)任教,为祖国培养了许多气象和气候专门人才,对气象科学事业,作出了很大贡献,在大气科学的教学和科研方面成就卓著。直到退休后仍笔耕不止,论文和著作延绵不断,至今已在国内外各种刊物发表学术论文200多篇,出版教科书和专著7部。尤其是近年来他与江志红教授合著的《极端气候研究方法导论》及时填补了我国在该领域的空白,率先对国际上关注的重要问题加以研究,很有意义。

当前的这部专著,更从随机过程理论认识到,气象观测记录只不过是随时间演变着的大气物理系统状况的一种写照。严格说来,气象观测记录,并非是一组随机样本,而只是时间的函数,原则上它们并不相互独立,这一全新的学术思想非常符合大气科学的客观事实。

在近代统计数学领域,随机过程理论占有重要地位。而在理论上较为成熟且应用上具有较大进展的,一般认为有两大分支:其一是平稳随机过程;其二是Markov过程。作者在《气象时间序列信号处理》这本专著中已重点阐明了第一分支的基本原理和气象应用,而本书则主要是从Markov过程和Markov链来对大气变化和运动过程加以描述。

20世纪后期,国际上以非线性耗散结构理论和协同学理论为代表的一种全新的“复杂系统科学”逐步形成并受到科学界的高度重视,例如,协同学理论中的自组织现象及耗散结构系统都涉及应用Markov链理论推导的主方程。在大气科学界虽有学者已经引进了这类新的理论,并逐步形成了随机—动力气候学和非线性随机—动力气候学的内容,但都未做出详细的解读和研究。近年来,经典大气动力学受到有关“内在随机性和外在随机性”问题的挑战,加之全球气候系统模式AOGCM模拟结果所存在的种种不确定性,采用统计降尺度方法细化区域和局地预测结果不失为一种有效途径,其中以Markov链理论为基础,应用Monte-Carlo随机模拟方法,构造随机天气发生器模型可以重复产生理想的模拟序列。研究表

明,利用 Markov 链模型作为描述逐日气象要素演变过程的统计学模型是相当可行的。而基于 Markov 链模式的随机天气发生器是目前较为流行的模型之一。近几十年来,这类模拟方法又有新的发展,已经提出了基于 Markov 链和隐 Markov 链(HMM)方法的一系列包括逐日降水、温度、土壤湿度和太阳辐射及其大气环流型在内的随机模拟模式。

天气本是气候变化的基础,气候特征又是天气演变的背景。极端气候事件的出现,往往与强烈的天气转折有关,某种天气状态的持续与转折总有一定的规律可寻,各地不同气候条件所具有的天气状态转移概率的极限分布代表了各地天气气候的持续性、转折性和可预报性特征。在这一领域尚有许多问题值得深入探讨。借助于 Markov 链理论对未来气候情景的预估也有一定的可行性。所有这些有益于气候和日常天气预报的研究都有重要的学术意义。丁裕国教授等人所撰写的这本专著,开创了我国大气科学界统计学与动力学相结合的范例。另一方面,本书所阐述的随机动力学也为发展新一代的天气气候预测理论和方法提供了有价值的参考。

中国工程院院士

丁一汇

2012 年 9 月 3 日

前 言

人们对大气系统中的各种要素的观测记录,实际上都是时间的函数,原则上它们并不相互独立。从某种意义上说,任何观测记录都只是随机过程的一次现实(即样本函数)。因此,大气系统中的各种要素的观测记录,并不等同于数理统计学理论中的随机抽样的概念。换言之,气象观测记录序列并非就是一组随机样本,因其前提条件并不完全满足于数理统计学所要求的抽样独立性和等可能性。所以,严格说来,气象观测记录只不过是随时间演变着的大气物理系统状况的一种写照。例如,某地的逐日气温观测序列显然不能看作统计学的一个随机样本,而只能看作是逐日随机过程的一次现实;至于具有年际相关性的其他气候统计量,是否严格符合随机抽样条件,也需要深入探讨,不能一概而论。可见,若将一组气象或气候观测值记录序列作为气象或气候随机过程的一次现实来分析,应当说是合理的。

在近代统计数学领域,随机过程理论占有重要地位。而在理论上较为成熟且应用上具有较大进展的,一般认为有两大分支:其一是平稳随机过程;其二是 Markov 过程和 Markov 链。我们在《气象时间序列信号处理》这本专著中已重点阐明了第一分支的基本原理和气象应用,本书不作赘述。

Markov 链理论是 1907 年由俄罗斯著名科学家 A. A. Markov(1856—1922)奠定的,后人为了纪念他的这一贡献遂将其命名为 Markov 链或 Markov 过程。近一百多年来,Markov 过程理论及其应用有了很大发展,尤其是近几十年来,几乎在所有科学或学科,如天文科学、数理科学、生物科学、地球科学、工程科学和社会科学的各部门,有关 Markov 链应用的论著或论文一直都层出不穷。就国内大气科学界而言,以 Markov 链为基础的统计模型用于天气气候状态演变的研究尽管较少,但也与国际上基本同步。20 世纪 70 年代以来,以研究非平衡态的耗散结构理论和协同学为代表的新的统计力学取得了飞速进展。基于 Markov 链理论推导的主方程则是研究这类非平衡问题的有效方法。普利高津曾将主方程用于耗散结构问题,先后采用生灭过程、相空间及非线性三种形式的主方程讨论涨落与耗散结构。这些新的成果被引入气象学研究,有力地推动了大气科学理论的发展。例如,建立了大气系统的熵平衡理论和热力学熵模式,探讨了大气中的自组织现象,逐步形成随机—动力气候学内容。近年来,尽管 AOGCM 所模拟的各种排放方案下的未来气候情景已具有时间上的高分辨率,但其空间尺度分辨率仍有细化的必要,在全球不同地区采用嵌套的区域模式或者采用各种降尺度方法已经成为研究区域尺度气候状况的有力工具。基于 Markov 链模型的随机天气发生器是目前广为应用的降尺度方法之一。伴随着气候变化不确定性理论不断发展,基于 Markov 链理论的随机天气气候研究方法将得到不断丰富和完善。

此外,将当前气候条件(如当地月平均温度、降水量)作为输入的逐日天气状况模拟序列与实际观测序列尽管仍有一定的差异,但已有较高的逼真性。倘若能在未来气候情景下,保持这种逼真性,则未来气候情景下的各种基于逐日天气状态的总体气候特征就可较为真实地模拟

出来,如日平均最高(低)温度、辐射、相对湿度、高(低)温日数、降水日数、最大降水量、最高(低)温度极值等。

撰写本书的目的之一,是从 Markov 链理论出发,探讨用 Monte-Carlo 随机模拟方法建立各种统计或动力模式,并应用于大气科学领域,如统计降尺度技术、复杂大气动力学系统的主方程和涨落理论、极端天气气候事件的频率分析等。

全书分三篇共 7 章:第一篇为基础篇,其中第 1 章叙述 Markov 过程与 Markov 链的基本理论;第 2 章简述新近发展的隐式 Markov 过程模式及其他具有 Markov 性的模型;第 3 章则叙述随机模拟(Monte-Carlo)方法与时空降尺度技术;第二篇为应用篇,其中第 4 章简介水文气象变量的随机模拟及其应用;第 5 章叙述基于 Markov 链的天气气候变量的随机模拟技巧;第三篇则是前沿篇,其中第 6 章重点涉及 Markov 过程与复杂气候系统问题;第 7 章简述气候不确定性及其他一些问题如多变量极值分布及其在极端天气气候事件分析中的应用。第 1、2、6、7 章由丁裕国、王冀共同编写,第 3、4 章由刘吉峰编写,第 5 章由王冀、刘吉峰共同编写,全书由丁裕国负责统稿。

本书的基本素材除了我们多年从事研究工作的积累外,还来源于国内外同行专家及学生们多年来的研究成果,在此一并致谢。非常感谢气象出版社的蔺学东先生对本书出版给予的大力协助和支持,他严谨、细致和耐心的工作是本书得以顺序出版的保证。特别需要指出的是,南京信息工程大学江志红教授在本书编写和出版过程中给予许多宝贵的建议,在此表示衷心的感谢。

本书出版得到北京市科委绿色通道项目“北京地区强降水定量预报及风险预警技术研究与应用”和公益性行业(气象)科研专项“近百年全球陆地气候变化监测技术与应用”(编号 20120624)资助,在此表示感谢。

丁裕国

2012 年春于南京高教新村寓所

目 录

序 言	
前 言	
绪 论	(1)

一、基础篇

第 1 章 Markov 过程与 Markov 链	(9)
1.1 基本概念和运算	(9)
1.2 转移概率的重要性质和运算	(10)
1.3 状态的划分和 Markov 链的分类	(12)
1.4 随机游动模型和 Markov 链	(16)
1.5 正则 Markov 链及其简单应用	(18)
1.6 Markov 极限分布在降水气候特征描述中的应用	(26)
第 2 章 隐 Markov 过程及其他随机过程	(32)
2.1 隐 Markov 模型的定义	(32)
2.2 隐 Markov 模型的运算	(33)
2.3 HMM 模型的应用	(38)
2.4 具有 Markov 性的其他随机过程	(49)
第 3 章 随机模拟方法与时空降尺度技术	(53)
3.1 基本概念	(53)
3.2 随机变量的模拟(各种分布的模拟)	(54)
3.3 随机过程的模拟	(58)
3.4 降尺度技术简介	(59)
3.5 随机天气发生器(WGEN)	(69)

二、应用篇

第 4 章 气候和水文变量的模拟试验	(81)
4.1 空间随机变量的模拟	(81)
4.2 由旱涝特征重建历史降水量场的模拟试验	(83)

4.3	SWAT 模式的逐日天气子模式简介	(88)
4.4	SWAT 模式在水文科学中的应用	(92)
4.5	改进 SWAT 模型的随机天气发生器及模式评估	(118)
第 5 章	基于 Markov 链的天气气候变量随机模拟	(120)
5.1	逐日降水量的 Markov 链模拟	(120)
5.2	干湿日游程的简化(0,1)变量序列模拟	(123)
5.3	干湿月游程的 Markov 链模拟	(123)
5.4	时间序列交叉理论的应用	(131)
 三、前沿篇 		
第 6 章	复杂气候系统与 Markov 过程	(145)
6.1	一般动力学系统的描述	(146)
6.2	非线性动力学(含大气动力学系统)	(150)
6.3	涨落理论及其大气科学的应用	(154)
6.4	两个重要的随机微分方程	(156)
第 7 章	若干问题的探讨	(159)
7.1	不确定性问题	(159)
7.2	极值统计理论在气候变化不确定性研究中的应用	(170)
7.3	利用二维分布和 Markov 链相结合描述区域暴雨过程的算例	(173)
7.4	线性相关关系形成的理论机制	(187)
参考文献		(192)
后记(一)		(199)
后记(二)		(200)

绪 论

近年来,全球气候变化已成为科学界关注的焦点。气候极值与非气候极值在时间域上的分布往往是一个个接近脉冲函数的起伏序列,这种时间序列很适合应用 Markov 过程或 Markov 链的分析方法。将随机天气发生器方法引入气候时空降尺度技术中,为 Markov 过程的应用重新开拓发展了更为广阔的研究空间。所谓降尺度方法,乃是基于把区域气候变化情景视为大尺度(如大陆尺度,甚至行星尺度)气候背景条件下,由大尺度、低分辨率的 AOGCM 模式输出信息转化为区域尺度的地面气候变化信息(如气温、降水)的一种技术方法,它弥补了 AOGCM 对区域气候变化情景预测的局限性。目前,降尺度技术得到了进一步发展,通常分为动力和统计降尺度两类。而后者则包括函数转换法、天气分型法、随机天气发生器三种方法。Markov 链方法就是随机天气发生器方法的一种。随机天气发生器是一系列可以构建气候要素随机过程的统计模型,它们可以被看作是一种复杂的随机数发生器。随机天气发生器通过直接拟合气候要素的观测值,得到统计模型的拟合参数,然后用统计模型模拟生成随机的气候要素时间序列。

Markov 过程与平稳随机过程既然是随机过程理论的两大主要分支,那么,验证某序列是否为 Markov 过程或 Markov 链,首先就是要验证它们是否具有 Markov 性。什么是 Markov 性?通俗地讲,如果一个随机过程的“将来”仅仅依赖于“现在”而不依赖于“过去”,则此过程即为具有 Markov 性的 Markov 过程。换言之,它是一种“无记忆”过程,例如,就逐日时间序列而论,今天的状况只与昨天的状况有关,而与前天的状况无关。明日只与今日有关,而与前日并无直接的关系,这就是 Markov 性,俗称“无后效性”。

Markov 链是具有 Markov 性质的离散时间随机过程。该过程中,在给定当前知识或信息的情况下,过去(即当期以前的历史状态)对于预测将来(即当期以后的未来状态)是无关的。从理论上说,Markov 链是一个随机变量序列。这些变量所有可能取值的集合,被称为“状态空间”,而 Markov 链在时间点 n 的取值即被称之为它在时间点 n 的“状态”。如果对于时间序列的 $(n+1)$ 时间点,过去状态的条件概率分布仅仅是时间点 n 的一个函数。即为具有 Markov 性,又称为 Markov 过程的无后效性。

值得指出的是,所谓 Markov 过程的无后效性也还是一种理想状况,它们与实际过程的千差万别也是存在的。

1. Markov 过程的基本概念

随机过程理论产生于 20 世纪初,可以说,一切所谓随机过程,都只不过是随机变量理论的进一步推广。我们知道,概率论是研究随机变量的数学理论。在概率论中研究对象是指单一变量而言,即一维的,至多是二维的,或是多维的,等等。但是,假如将概率论的研究范围进一步扩大:(1)将其研究对象扩大为某个随机变量的序列(有限集或无限集,或不可数集);(2)将

随机变量序列(可数或不可数集)视为另一参数(如时间或空间)的函数。那么,我们就可以称这样的随机变量序列或不可数集的随机变量集合为随机过程。例如,Markov 过程具有无后效特性,其参数 t 若看作为时间,则表明,“现在” t_r ,某个系统 X 的状态与“未来” $t > t_r$ 的 X 的状态是有关联的,而与其“过去” $t_1 < t_2 < \dots < t_{r-1} (< t_r)$ 的 X 的状态无关。也可以这样说,系统 X 的未来状态只通过现在状态与过去状态发生联系,一旦“现在”已知,“未来”和“过去”就是无关的了。为了强调 $\{X_t\}, t=0,1,2,\dots$ 的参数是非负整数,对于具有 Markov 特性的时间离散且变量的状态也离散的一类随机过程又称之为 Markov 链,这是本书的主要研究对象。此外,后面将要提到的独立增量过程就是与 Markov 过程有关的一种随机过程,其增量是一组相互独立的随机变量。理论上可以证明,它就是 Markov 过程的一种特例。如果独立增量过程本身又是均值函数为零的平稳二阶矩过程,则又称其为正交增量过程。而且,假定一个独立增量过程,其增量的分布仅与参量的差值有关,与参量本身的位置无关,则称这一过程为齐次的。在随机过程理论中早已证明了以下的两种独立增量过程。

其一是维纳—爱因斯坦(Wiener-Einstein)过程。作者曾在《气象时间序列信号处理》一书的第一章提到了随机过程的一般定义和性质,其中主要提到了平稳随机过程具有有限方差函数和均值函数。而所谓 Wiener-Einstein 过程,实际上它既具有平稳正态过程的特点,又具有 Markov 过程的特性,其均值函数为零,而其方差为参量差值的函数。假如以时间为参量,则过程增量随时间间隔的增大而不断改变。其二是 Poisson 随机点过程,它也是一类应用十分广泛的统计数学模型。在医学、社会学、经济学、电子与通信科学及软件与硬件可靠性等许多科学领域都能找到应用 Poisson 随机点过程的例子。而在水文、气象和地学科学领域中,更有广阔的应用空间。所谓 Poisson 随机点过程,简而言之,是指下列这样的独立增量过程:对每一时刻,过程增量(记为 X_t)均为服从 Poisson 分布的随机变量。为便于读者直观理解这类过程,我们举一气象例子,假定暴雨出现的过程符合 Poisson 分布,即在时段 $(0, t)$ 内,暴雨出现次数 $N(t)$ 为具有参数 λt 的 Poisson 分布,则有:

$$P(N(t) = n) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} \exp(-\lambda t) \quad n = 0, 1, \dots \quad (0.1.1)$$

式中: λ 称为暴雨发生率或到达率(即在单位时间中出现的暴雨次数),由此可计算在时段 $(0, t)$ 内各时刻出现 $n=0, 1, \dots$ 次暴雨的概率。换言之,在任何时段 $(0, T)$ 内,暴雨次数也服从 Poisson 分布,其参数为 λT 。若假定随机(白噪声)降雨量为 R ,显然它们与暴雨的出现次数有关。例如,假定 R 服从 Gamma 分布,其形状和尺度参数分别为 (α, β) 。我们称这类过程为 Poisson 白噪声过程(简记为 PWN),它是最简单的 Poisson 随机点过程。如果同时考虑在时段 $(0, T)$ 内的总降水量,则可设定累积降水量为 $Z(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} R_i$,这种累积的降水过程就是复杂 Poisson 点过程。由于 PWN 模型过于简化了实际过程,在应用于降水量模拟时误差较大,仅在特殊场合应用,一般并不采用。

2. Markov 过程的研究进展

在许多学科的研究中,都涉及 Markov 类的随机过程,例如,在独立增量过程和泊松过程的基础上,发展了均匀独立增量过程和均匀泊松过程,进一步推广就有富雷—雅尔(Furry-yule)过程(或增长过程),后来又发展出所谓增消过程(又称生灭过程)。这类随机过程虽然都

同属于一类 Markov 过程,但由于其应用领域不同,其术语也略有区别。20 世纪以来,随着信息科学、生物科学、物理科学和地球科学的发展,一些非常有用的随机过程理论也得到相应的发展。如纯不连续 Markov 过程,该类过程是指那些时间参量连续变化,但其状态却是跳跃变化的。由此就可导出所谓扩散过程。所谓扩散过程非常有用,如城市大气环境中污染物的扩散过程与此模型有密切关系,而近年来,由于复杂性科学的进步,引入 Markov 过程和转移概率函数结合微分方程理论导出了许多普适性的微分或积分方程,如科尔莫哥洛夫方程、前进方程、后退方程等,如何深入研究这类学术思想,对于发展随机—动力气候模拟十分有用。关于这类概念在本书第 1 章中将有更详细说明。

以大气科学中的应用研究为例,1953 年 Brooks 和 Carruthers 在其合著的《气象学统计方法手册》一书中首次应用了 Markov 链方法分析逐日晴雨的变化过程,其后 Gabriel 和 Neumann(1962)用一阶两状态简单 Markov 链研究了以色列特拉维夫的逐日干湿变化;从此在国际上,采用简单 Markov 链模拟逐日干湿(或干湿期)变化得到了推广应用(Weiss, 1963; Green, 1964; Caskey, 1964; Feyerherm 等, 1965; Katz, 1974; Gates 等, 1976)。20 世纪 70 年代 Allen 和 Haan(1974)率先提出了改进的多状态 Markov 链并应用 Monte-Carlo 随机模拟方法研究逐日干湿变化。自从 20 世纪 80 年代以来,有不少学者进一步提出了用多状态 Markov 链描述不同程度的干湿状态演变,例如,Billard 和 Meshkasi 认为根据实测降水量多少可将湿日细分为不同湿润程度的状态(Allen 等, 1974)。20 世纪末到 21 世纪初,美国农业部提出的有关水资源管理的 SWAT 模式大量运用 Markov 链方法,模拟逐日降水和各种气象要素变化,取得了显著效果。

在国内,Markov 链模式模拟气候序列的研究工作做得不多,么枕生(1966)为了改进 Markov 链无后效性的缺点,曾提出过一种划分状态的方法:用各状态的历史演变来定义新的“状态”取得了较好效果。王宗皓和李麦村(1974)用 Markov 链研究了天气变化的持续性指标及其预报问题。周家斌等(1975)用 Markov 链预报浙北汛期逐日晴雨变化。卢文芳(1986)曾利用简单 Markov 链对我国逐日降水过程的统计特征做了初步分析并讨论了 Markov 链阶数确定的一些问题。张耀存等(1990)从逐日降水过程干湿日演变的一阶 Markov 链及日降水量的 Gamma 分布模式出发,从理论上得到任意给定时期 N 日降水总量及最大日降水量的理论分布函数,同时得到 N 日总降水量和最大日降水量的数学期望和方差,初步证实所得模式的普适性。因此,可利用该模式估计任意给定时期内 N 日降水总量和最大日降水量的概率。丁裕国等(1990)还利用 Markov 链研究我国各大气候区若干代表测站干湿月游程的统计特征,得到许多有实际应用意义的气候统计信息。丁裕国等(1987)利用多状态 Markov 链,根据模拟理论建立一种用以产生单站逐日降水量模拟记录的随机模式,通过检验发现,模式模拟的气候统计参数同实测结果十分吻合。廖要明等(2004)曾建立过一个适用于中国广大地区的随机天气发生器,并重点介绍了常用的随机降水模拟模型(两状态一阶 Markov 链和两参数分布),根据各地不同月份计算的 4 个降水模拟参数对中国各地的逐日降水进行模拟,并利用实测的年数据对 30 年模拟结果在统计意义上进行了检验,模拟结果较好。董婕等(1997)以两状态一阶 Markov 链和两参数 Gamma 分布为天气发生器,发现 Markov 模型做气象要素短期预报能够得到较理想的结果。的确,此方法对气象资料和计算条件的要求都不高,而它有较大的实用性,能较好地反映气象要素的一般变化规律。例如,张家诚等(1963)就曾用 Markov 链研究月平均环流场的切比雪夫展开系数序列的演变规律;前已提及,么枕生(1966)用隐含前期状态的

历史演变特征作为状态划分标准从而改进了 Markov 链无后效性的缺点,这类方法就是目前广为学者所应用的隐 Markov 链模型的一种;此外,还有多位学者利用 Markov 链为工具研究我国各地旱涝、干湿、环流型的变化等多种问题;例如,么枕生(1990)年曾提出过用 Markov 链和自回归相结合,描述干湿游程和转折点的概率计算方法。近几十年来,关于这类模拟方法又有新的发展。Richardson(1981)提出了对降水、温度和太阳辐射的一系列随机模式模拟逐日天气演变;Racsko 等(1991)提出了包括 Markov 链在内的各种模拟天气演变的方法;Bardossy 和 Plate(1991)提出了用大气环流型表示的半 Markov 链方法。丁裕国等(2009)利用多状态 Markov 链,根据 Monte-Carlo 方法建立了一种用以产生单站逐日降水量记录的随机模式估计极值分位数的方法,统计检验表明,模式模拟的气候统计参数与实测结果十分吻合,据此就可间接估计出各种不同重现期的极值分位数。由此可见,利用 Markov 链模型作为描述逐日气象要素演变过程的统计学模型是相当可行的。

将当前气候条件(如当地月平均温度、降水量)作为输入的逐日天气状况模拟序列与实际观测序列尽管仍有一定的差异,但已有较高的逼真性。倘若能在未来气候情景下,保持这种逼真性,则未来气候情景下的各种基于逐日天气状态的总体气候特征就可以较为真实地模拟出来,如日平均最高(低)温度、辐射、相对湿度、高(低)温日数、降水日数、最大降水量、最高(低)温度极值等。天气是气候变化的基础,气候特征又是天气演变的背景。转折性天气往往是日常预报的难点,尤其是极端天气气候事件的出现,都因强烈的天气转折而产生。某种天气状态的持续与转折总是有一定规律可循的,各地不同气候条件所具有的天气状态转移概率的极限分布代表了各地天气气候的持续性和转折性特征,在这一领域尚有许多问题值得深入探讨。

3. Markov 过程研究在 21 世纪的新进展和未来展望

Markov 模型是对实际随机过程的一种简化,在自然界中大量存在着近似于 Markov 特性的随机过程。因此,国际上历来对这一领域十分重视。在国内,不少学科也都有一定的应用和进展,例如,在生物、物理、化学、社会科学、地学等方面,尤其在通信工程、自动控制、水文、地质、气象等学科和管理科学中都得到了极其广泛的应用。近年来,全球变化研究已成为科学界关注的焦点。将随机天气发生器方法引入气候降尺度技术中,又为 Markov 链统计学的应用重新开拓发展了更为广阔的研究空间,如常用的 Poisson 随机点过程、生灭过程、扩散过程等。

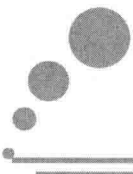
特别值得一提的是,21 世纪以来,隐 Markov 模式(HMM)的应用研究十分活跃。尤其是在语音和信号识别、计算机科学、金融预测等学科领域已有相当丰富的研究成果,但是,HMM 在地球科学和大气科学中的应用还较为少见,在国内几乎是空白。作者认为,HMM 模式在气象学和气候学乃至一切地学学科(包括农业科学)的应用,其前景十分看好。仅举下面的例子即可说明。

(1)目前包括卫星在内的各种遥感数据资料,已经有相当丰富的积累,如何根据遥感数据资料将地面的各种要素记录反演出来,以减小其误差,这是一个非常棘手的问题。而如果能较好地建立一种 HMM 模式来模拟有关各种要素记录,将不失为一种解决的途径。

(2)通常的短期或中期天气预报,往往将预报因子纳入线性回归模型或其他线性模型中,但如果采用隐式 Markov 模式建立一种具有概率意义的随机预测模式,也许有更好的效果,因为严格说来,线性回归模型或其他线性模型都是建立在样本中的样品为相互独立假定基础上的,而实际上,其相互之间并非独立。

(3)在气候变化研究中,通常的统计降尺度技术,对未来预估的气候状况,仅用随机天气发生器来模拟,最多只用到 Markov 链模拟逐日天气,如能加入大气环流背景条件的演变,则其物理意义则更加清楚,这就需要用隐式 Markov 模型建立各种具有物理解释的统计气候模式。

诸如此类,以上只是列举出一部分应用之例而已,更为广泛的应用,还需要读者不断地推陈出新,创造新的应用成果。总而言之,基于 Markov 过程的各种统计概率模式或时间序列模式,一旦与随机模拟(Monte-Carlo)方法相结合,可能是气象学和气候学科的重要研究途径之一。



一、基础篇
