

利用随机天气模式及多种插值方法生成 逐日气候变化情景的研究*

吴金栋 王馥棠

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

针对目前大气环流模式在用于气候变化影响评估研究中时间分辨率较低的局域性, 以及气候情景的要求和气候变化影响研究的需要, 结合 GCM 的模拟试验结果, 利用随机天气模式 WGEN 生成了中国东北地区未来气候变化的逐日情景, 其中包含了可能的气候变率信息, 可与作物动力模式等气候影响模式嵌套, 研究作物生长发育及其产量的可能变化, 及气候变率变化的可能影响等。

关键词: 逐日气候情景 随机模拟 插值

引 言

气候变化情景(简称气候情景)是在一系列科学假设基础之上, 对未来气候状态时间、空间分布形式的合理描述。90 年代以来, 已开展了大量有关气候变化情景生成技术的研究^[1-3]。主要方法有: 历史资料类比分析、古气候资料重建与分析、任意情景设置、大气环流模式(GCMs)输出和随机天气发生器系统生成等。

目前常见的方法是对 GCMs 输出结果进行修正。但 GCMs 和气候影响模式的时空分辨率不同, GCMs 不能在逐日尺度上给出可靠的模拟结果, 而气候影响模式一般需要细网格逐日资料, 使得 GCMs 输出结果与气候影响模式难以直接嵌套。另外, 在现有的技术水平下, GCMs 尚不能提供气候变率变化的可靠信息, 而气候变率变化所引起的极端天气事件频率、强度和持续时间的变化, 在某种程度上比气候平均状况的变化更能影响作物的生长发育^[4]。把天气信息嵌套到作物-气候模式中, 必须注意作物与天气之间关系的非线性性, 以往研究中未来气候变率不变的假设往往低估了气候变化的可能影响。

在高分辨率区域气候模式不断得到发展和完善的同时, IPCC 也将随机天气模式与 GCMs 相结合生成未来逐日气候变化情景的方法作为气候变化影响研究中模式嵌套的主要途径之一^[5]。国外对此已有不少研究成果^[6], 而国内的类似研究仍然较少。本文以大气环流模式(DKRZ OPYC)在中国东北地区(39°~ 51°N, 117°~ 133°E)的模拟结果为未来气候背景, 在对该气候背景进行初步插值订正以满足随机天气模式 WGEN^[7]输入要求的

* 本文由国家“九五”重中之重攻关项目“我国短期气候预测系统的研究”96-908-03-01 资助。
1999-04-29 收到, 1999-06-14 收到修改稿。

基础上,根据 WGEN 模式的参数估计方案及其随机试验方法^[8]生成该地区逐日气候情景。基准气候选用近 30 年(1961~1990 年)24 个站点(图略)的观测气候,包括最高气温、最低气温、降水量和日照时数等逐日气候要素,均来源于国家气候整编资料。

1 模式简介

1.1 随机天气模式 WGEN

WGEN 模式是利用统计学技术和各气候要素时间序列的统计结构,以 Richardson(1984)等构建的气候要素随机过程为基础发展起来的。模式能够模拟逐日降水量、最高气温、最低气温和太阳辐射等气候要素,并且在中国东北地区具有良好的模拟能力^[8]。

模式首先模拟晴雨序列,表示为

$$\{J_t: t = 1, 2, \dots\} \quad (1)$$

其中 $J_t = 1$ 表示第 t 日为雨日, $J_t = 0$ 表示第 t 日为晴日。采用的模型是两个状态(干、湿)的一阶马尔科夫过程(MP)。该过程由雨日频率参数 π 和降水持续参数 d 唯一确定。

$$\pi = Pr(J_t = 1) \quad (2)$$

$$d = Corr(J_t, J_{t-1}) \quad (3)$$

降水量的变化以二参数 Γ 分布,即位置参数 $a_0 = 0$ 时的皮尔逊 III 型曲线描述。

$$f(x) = x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} / \beta^\alpha \Gamma(\alpha) \quad (4)$$

$$x \geq 0, 0 < \alpha < 1, \beta > 1$$

其中 α 为形状参数, β 为尺度参数。月降水的年际变率与逐日降水特征(晴雨状态及降水量)有密切联系。

$$Var(P_k) \approx N_k \pi_k \alpha_k \beta_k^2 [1 + \alpha_k (1 - \pi_k) \frac{1 + d_k}{1 - d_k}] \quad (5)$$

其中 $Var(P_k)$ 为 k 月降水量方差, $\pi_k, d_k, \alpha_k, \beta_k$ 分别为 k 月雨日频率参数、降水持续参数、形状参数和尺度参数, N_k 为序列长度。

气温(最高、最低)和辐射等非降水要素 $X_t(j)$ 的模拟以降水的变化特征为条件:

$$\{X_t(j) | J_t = i: t = 1, 2, 3, \dots\} \quad (6)$$

$i = 0, 1$ 分别表示晴雨两种状态; $j = 1, 2, 3$ 分别表示逐日最高气温、最低气温和太阳辐射。模型采用多变量红噪声过程 AR(1)。

$$Z_t(j) = [A] Z_{t-1}(j) + [B] \epsilon_t(j) \quad (7)$$

式中 $Z_t(j)$ 为标准化以后的 $X_t(j)$, $\epsilon_t(j)$ 为正态白噪声序列, $[A], [B]$ 分别为参数向量。气温年际变率与逐日变率之间的关系可近似地表示为:

$$Var(T_{j,k}) \approx \frac{\sigma_d^2(j, k)}{N_k} \frac{1 + \rho_1(j)}{1 - \rho_1(j)} \quad (8)$$

其中 $Var(T_{j,k})$ 为 k 月气温年际变化方差, $\sigma_d^2(j, k)$ 为逐日变化方差, $\rho_1(j)$ 为一阶自相关系数。

1.2 大气环流模式 DKRZ OPYC

在我们得到的 5 个著名的海气耦合模式(CGCM)(DKRZ OPYC(德国)、DKRZ LSG

(德国)、NCAR(美国)、GFDL(美国)和HADL(英国))的渐近模拟结果中,只有DKRZ OPYC的输出结果同时含有最高气温、最低气温和降水量3个气象要素,限于WGEN输入的要求,本文选用该模式的模拟结果。

DKRZ OPYC模式中温室气体浓度变化采用IPCC 1992A方案,以有效CO₂当量浓度表示。模式输出为季平均值(因此需要进行插值以得到WGEN模式要求输入的月平均值),空间分辨率为5.6°×5.6°。模式模拟的2×CO₂时全球平均增温幅度为1.6℃。关于DKRZ OPYC在东亚地区(70°~140°E, 15°~60°N)的模拟可靠性,赵宗慈等人曾进行过详细评估,认为若考虑各个季节各个气候变量模拟的总体情况,DKRZ OPYC是目前模拟东亚气候较好的海气耦合模式之一^[9]。表1为该模式对东亚地区气候区域平均变化的模拟结果。

表1 DKRZ OPYC模拟的东亚气候区域平均变化^[9]

	春季	夏季	秋季	冬季	年平均
表面大气温度(<i>ST</i>)(℃)	1.9708	1.7556	2.1331	2.3214	2.0452
降水量(<i>P</i>)(%)	20.5392	10.4978	6.8344	6.9779	11.2123

就表面大气温度和降水来说,DKRZ OPYC模拟的东亚地区增暖比全球平均增暖强,其中冬季最强,夏季最弱;低纬度增温比中高纬度弱。2×CO₂时东亚地区各季平均降水都增加,其中春季和夏季的增加较秋季和冬季明显,但考虑到东亚地区降水主要集中在夏季,所以夏季降水量的绝对值增加是最强烈的。中国东北部则是夏季降水增加的几个高值中心(约30%)之一。

依据DKRZ OPYC模式的模拟,与东亚地区平均增温(表1)相比,中国东北地区秋季增温较弱,冬季增温较强,春、夏季增温与东亚地区平均差异不大^[9]。

从年、季尺度上讲,东北地区年最高、最低气温升温幅度分别为1.6°~2.6°和1.5°~1.9°,升温中心都在吉林东部地区。最高气温春、夏季增温形势与年最高气温增温形势基本一致,高纬地区增温一般大于低纬地区。秋、冬季增温线呈南—北走向,升温中心分别在吉林中部、辽宁东部和吉林东部地区。各季最低气温增温形势虽然不尽相同,但是吉林东部地区均为高值中心之一。年降水量的增量以黑龙江中部、吉林和辽宁东部为高值中心,其中夏季增幅最为显著,达0.7~2.0 mm/d,冬季125°E以东地区降水减少。

2 DKRZ OPYC 结果的提取、插值和订正

为获得足够的网格点值,保证空间场的可靠性,在比研究区域更大的范围内(35°~52°N, 112°~135°E),提取DKRZ OPYC输出的基于1×CO₂和2×CO₂的季平均差值场结果,即未来气候平均场变化情景。根据此情景(分辨率为5.6°×5.6°)进行空间插值,得到站点所在格点的值。由于WGEN要求逐月气候变量的输入,又对此情景(季平均)进行逐月时间插值。

2.1 空间插值及订正

采用克立格(Kriging)插值方法,将提取的各种不同要素的模拟结果插值到所选站

点, 再与基准气候叠加, 得到 $2\times CO_2$ 时中国东北地区各季各要素气候平均值情景(图略)。关于 Kriging 插值的详细理论与方法, 参见文献[10]。

2.2 时间插值及订正

2.2.1 插值方法的选取

本文选择一元全区间等距插值、一元三点等距插值、连分式等距插值、埃特金(Aitken)等距逐步插值和光滑等距插值5种插值方法, 每种方法又有满周期和分段插值两种处理, 尽可能充分利用有限的结点。为检验这5种方法10种插值的插值效果, 以基准气候季平均值作为1、4、7、10月的对应要素值, 反插逐月要素值, 对实测值和反插值进行比较分析。结果表明, 最高、最低气温可采用一元全区间等距插值或Aitken等距逐步插值, 其插值结果基本一致, 且明显优于其它插值方法; 降水量可采用一元三点等距插值或光滑等距插值, 后者较前者插值效果稍好。另外, 满周期和分段插值对插值结果影响不大。图1为用满周期Aitken等距逐步插值最高、最低气温和用满周期光滑等距插值降水时沈阳站反插值与实测值对比分析, 可见二者的变化趋势较为一致, 其量值差记为 $\Delta V_{i,k}$ 。

$$\Delta V_{i,k} = VIO_{i,k} - VO_{i,k} \quad (k = 1, 2, \dots, 12; i = 1, 2, 3) \quad (9)$$

式中 $VIO_{i,k}$ 、 $VO_{i,k}$ 分别为第 i 个要素第 k 月的反插值和观测值。

降水的插值误差远较气温大, 特别是夏季降水误差较大, 7月降水量偏低明显。这主要是由于以季平均降水量代替典型月(1、4、7、10月)降水量后, 平滑了很多信息的缘故。

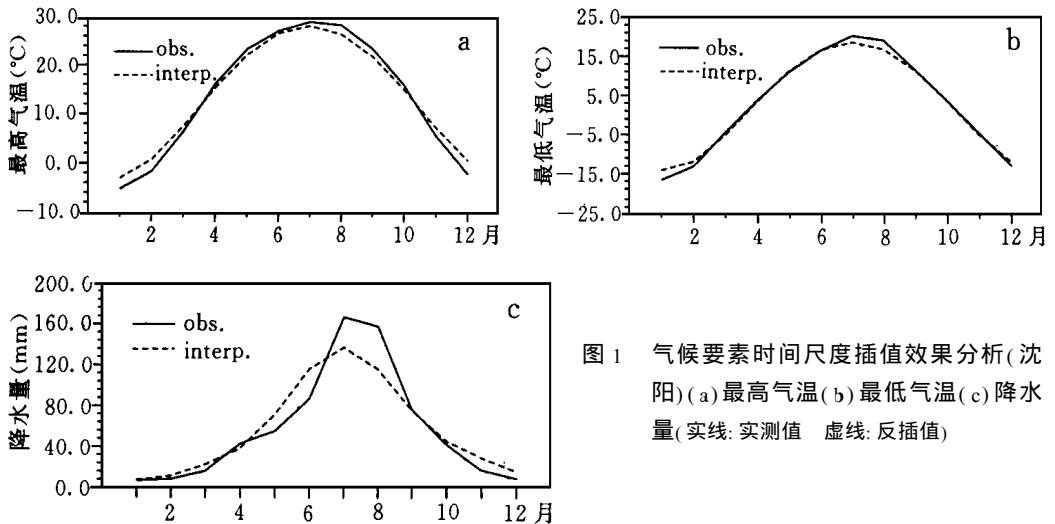


图1 气候要素时间尺度插值效果分析(沈阳)(a)最高气温(b)最低气温(c)降水量(实线:实测值 虚线:反插值)

2.2.2 插值及订正

采用光滑等距插值和Aitken等距逐步插值方法, 延长结点至全周期, 分别将DKRZ OPYC $2\times CO_2$ 模拟试验得到的季降水量和季最高、最低气温插值到逐月, 并对插值结果以 $\Delta V_{i,k}$ 进行订正。订正方法如下:

$$VI_{i,k} = VGI_{i,k} - \Delta V_{i,k} \quad (k = 1, 2, \dots, 12; i = 1, 2, 3) \quad (10)$$

式中 $VI_{i,k}$ 、 $VGI_{i,k}$ 分别为订正后的逐月要素值和订正前的插值结果。

表2给出了DKRZ OPYC模拟试验输出的要素增量(经Kriging插值到沈阳的量值)

及经时间插值订正前后的要素增量. 由表可见, 插值订正改善了插值效果, 除冬季最低气温插值误差没有得到明显降低外, 其余各季要素值与 GCM 输出均更加接近. 最高、最低气温和降水量的最大插值误差明显减小, 分别由 2.637°C 、 -1.275°C 和 -53.67mm 减小到 0.176°C 、 -0.760°C 和 -11.567mm , 在一定程度上补偿了 GCM 分辨率的不足, 保证 WGEN 模拟初始条件的可靠性. 气温年均值也有一定的改善, 但受年内各季降水订正前后增减的综合影响, 降水年总增量订正前后变化不大. 由此也可以看出插值方法在构建气候变化情景时的局限性, 特别是在逐次插值到细小尺度时, 其误差是不容忽视的.

表 2 DKRZ OPYC 输出及其插值订正前后最高气温 (T_{\max})
最低气温 (T_{\min}) 和降水量 (p) 增量对比分析(沈阳)

	春	夏	秋	冬	年
ΔVG_1	1.904	0.958	1.596	2.034	1.623
ΔVGI_1	1.570	-0.044	1.298	4.671	1.874
ΔVI_1	1.885	1.028	1.601	2.210	1.681
ΔVG_2	1.455	1.215	0.990	3.178	1.710
ΔVGI_2	1.264	-0.060	0.801	3.938	1.486
ΔVI_2	1.500	1.205	1.068	2.418	1.547
ΔVG_3	19.401	101.929	32.993	14.094	167.707
ΔVGI_3	43.578	48.258	51.103	23.996	166.935
ΔVI_3	25.524	90.362	36.895	12.716	165.497

注: 表中 ΔVG_i 、 ΔVGI_i 、 ΔVI_i 分别为 DKRZ OPYC 输出增量、直接插值后增量和插值订正后增量, $i=1, 2, 3$ 分别表示 $T_{\max}(\text{C})$ 、 $T_{\min}(\text{C})$ 、 $p(\text{mm})$.

3 逐日气候变化情景的生成和分析

由于 DKRZ OPYC 没有给出未来气候雨日数变化的信息, 因此模式运算假定未来气候的逐月雨日数与当前气候一致. WGEN 模式的其它输入取自上述通过时空插值和订正得到的 DKRZ OPYC 模拟结果. 序列长度 30 年, 生成中国东北地区未来逐日气候情景.

作者通过对基准气候的模拟, 对 WGEN 模式进行了全面的评估^[8], 结果表明该模式能基本再现中国东北地区的气候统计特征. 由于无法检验模式对于未来逐日气候的模拟, 只能比较模式模拟的气候平均场与插值订正后 DKRZ OPYC 在中国东北地区的试验结果. 表 3 给出代表站沈阳逐月气候要素的对比结果. 由表可见, 除个别月份的个别要素外, 如 9 月降水量偏小, WGEN 模拟值与 DKRZ OPYC 试验值基本一致. 对其余所选站点的对比分析也有类似结果. 也就是说, WGEN 以 DKRZ OPYC 模拟为试验背景, 生成的逐日气候情景具有可靠的气候背景, 即至少是该气候背景下气候要素的一种分布规律. 根据 Monte Carlo 数值计算理论, 该情景是大量样本中气候要素的最合理描述形式.

从生成的 24 个站点的逐日气候要素变化情景中可以明显地看出利用随机天气模式生成气候情景的优势. 图 2 为代表站沈阳 WGEN 模拟的逐日最高、最低气温和降水量相对于基准气候的变化情景. 由图可见:

表 3 WGEN 模拟试验与 DKRZ OPYC 试验结果对比分析

月	最高气温 T_{\max}		最低气温 T_{\min}		降水量 p	
	$VI_{1,k}$	$VW_{1,k}$	$VI_{2,k}$	$VW_{2,k}$	$VI_{3,k}$	$VW_{3,k}$
1	- 3. 257	- 0. 6	- 13. 436	- 12. 1	11. 441	7. 73
2	0. 660	1. 0	- 10. 944	- 10. 7	10. 897	6. 53
3	8. 713	7. 6	- 2. 730	- 3. 6	19. 999	20. 09
4	17. 954	15. 0	5. 257	4. 6	49. 267	48. 47
5	24. 718	23. 8	12. 442	13. 2	70. 437	72. 06
6	28. 192	29. 4	17. 897	19. 4	114. 972	123. 81
7	29. 907	31. 5	21. 635	21. 5	200. 427	193. 94
8	29. 304	29. 1	20. 378	19. 0	185. 644	193. 56
9	24. 721	23. 2	12. 882	12. 7	95. 048	72. 48
10	17. 578	15. 4	5. 059	4. 3	53. 161	52. 20
11	7. 703	7. 5	- 2. 957	- 3. 8	24. 782	26. 55
12	- 0. 010	0. 0	- 10. 611	- 11. 4	13. 862	12. 01
年	15. 458	15. 2	4. 736	4. 4	852. 147	829. 42

注: 表中 $VI_{i,k}$ 同式(10), $VW_{j,k}(i=1, 2, 3; k=1, 2, \dots, 12)$ 分别表示 WGEN 模拟的逐月 $T_{\max}(\text{C})$ 、 $T_{\min}(\text{C})$ 和 $p(\text{mm})$ 。

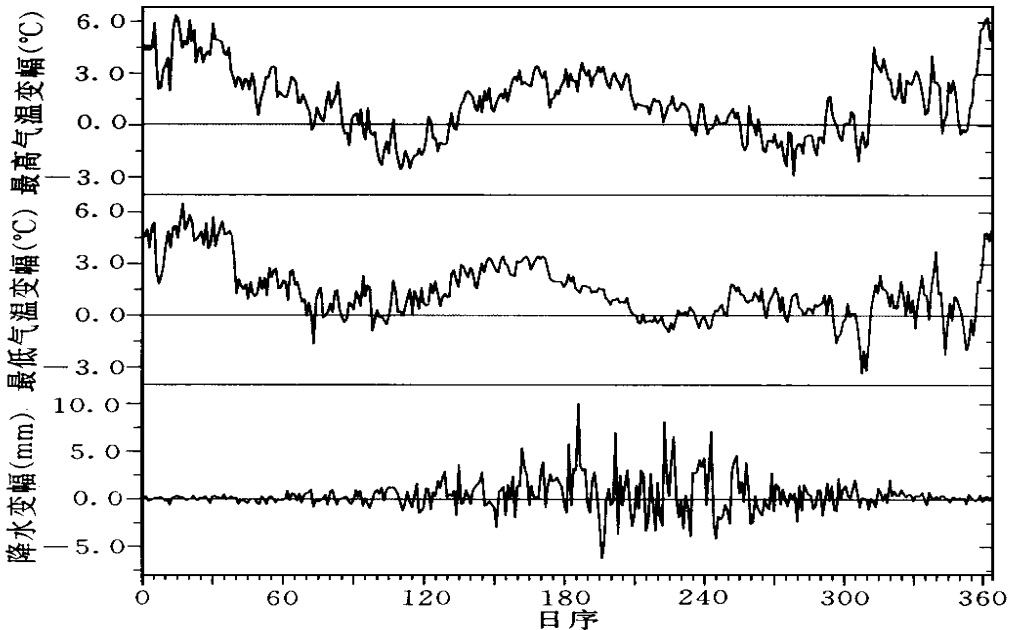


图 2 WGEN 模拟的逐日最高、最低气温和降水量情景相对于基准气候的变化(沈阳)

(1) 虽然未来气候的平均值与基准气候相比表现为气温升高、降水增加, 但是随机试验得到的未来逐日气候要素值并不是线性增加的, 气温和降水在任何月份内的变幅都不均匀, 在有些时段或时次甚至表现为降低或减少. 如最高气温除 1、2 月和 6、7 月, 其它月

内都有下降的时段或时次; 最低气温在 3~4 月、8 月和 10~12 月也有类似情况; 即使在降水增加最为强烈的夏季, 降水量也不是每天都均匀增加的. 因此, 传统方法生成的仅包含气候平均状态变化信息的气候情景对于评估气候变化的可能影响显然是不足的, 若考虑到作物与天气之间的非线性关系, 逐日气候要素的这种非线性变化则更加重要.

(2) 由于目前还不能确定未来气候变率(包括气温变率和降水变率)将如何变化, 图 2 生成的逐日气候情景也有多种可能分布形式. 在研究具体的气候影响对象, 如作物生态系统的物质能量转化过程时, 最高、最低气温和降水量的不同分布形式对光合同化、呼吸消耗和干物质的分配都会有不同的作用.

(3) 在生成的逐日气候情景中, 最低气温增幅并不是在任何时候都大于最高气温增幅. 因此, 笼统地认为最低气温增幅大于最高气温增幅的传统观点也不够细致.

4 小结和讨论

为了评估气候变化的可能影响, 必须定量地表示气候变化本身, 以便作为作物生长动力模拟模式等气候影响模式的输入. 本文以 DKRZ OPYC 在中国东北地区的模拟结果作为气候背景场, 通过时空解集和订正, 在确定 WGEN 参数化方案及其随机试验方法的基础上, 利用该模式结合 DKRZ OPYC 较低分辨率的输出要素, 调控逐日随机过程的参数, 生成了该地区未来气候变化的逐日情景. 分析表明, 上述气候情景生成方法在中国东北地区具有传统方法所没有的明显优点. 生成的气候情景不仅其时间尺度可以满足影响研究的需要, 而且包含了气候平均值和可能的气候变率, 并且可以任意调整气候变率, 生成任意长度的时间序列, 为研究同一气候背景下不同天气事件的影响, 确定气候影响可能范围提供了新的思路和手段. 同时可以评估未来产量变率的变化, 研究作物产量的可持续性, 因为产量的年际变化在某种程度上比平均产量的变化更加重要^[1].

文中利用随机天气模式生成的逐日气候情景是以气候模式的模拟结果作为未来气候背景的, 因此生成的气候情景的可靠性首先依赖于气候模式的模拟能力. 其次, 进一步改进、完善 WGEN 模式对于气候要素统计学特征的描述方法及模式的参数化方案, 也是提高所生成气候情景可靠性的必要条件.

为了得到 WGEN 要求输入的月平均值, 且生成基于站点的未来气候情景, 本文对 DKRZ OPYC 低分辨率的季模拟结果进行了初步的时空解集. 将来如有模拟要素齐全、模拟输出时间分辨率为月的 GCM, 即可直接利用随机天气模式生成逐日气候的网格情景.

参 考 文 献

- 1 Parry M L. Climate Change and World Agriculture. London: Earthscan publications Ltd., IIASA, UNEP, 1990. 157.
- 2 Smith J B, Tirpak D, et al. The Potential Effects of Global Climate Change on the United States. U. S. /EPA, EPA-230-05-89-050, 1989. 413.

- 3 Carter T R, Parry M L, Nishioka S, et al. Climate Change: Preliminary Guidelines for Assessing Impacts of Climate Change. ECU/CGER, 1992. 28.
- 4 Katz R W, Brown B G. Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages. *Clim. Change*, 1992, **21**: 289~ 302.
- 5 IPCC. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Eds: by Houghton J T, Meira Filho L G, Callander B A, et al. Cambridge University Press, 1996. 572.
- 6 Wilks D S. Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies. *Clim. Change*, 1992, **22**: 67~ 84.
- 7 Richardson C W, Wright D A. WGEN: A Model for Generating Daily Weather Variables. U. S. Dept. of Agriculture, Agricultural Res. Service, 1984, ARS-8, pp83.
- 8 吴金栋, 王馥棠. 随机天气模式参数化方案的研究及其模拟能力评估. 气象学报, 2000, **58**(1): 42~ 51.
- 9 赵宗慈, 丁一汇, 李晓东, 等. 海气耦合模式在东亚地区的可靠性评估. 应用气象学报, 1995, **6**(增刊): 9~ 18.
- 10 侯景儒, 郭光裕. 矿床统计预测及地质统计学的理论与应用. 北京: 冶金工业出版社, 1993. 354~ 385.
- 11 Mearns L O, Resorvzweig, Goldberg R, et al. Mean and variance change in climate scenarios: methods, agriculture applications, and measures of uncertainty. *Clim. Change*, 1997, **35**: 367~ 396.

STUDY ON THE CREATION OF DAILY CLIMATIC VARIATION SCENARIOS WITH A STOCHASTIC WEATHER GENERATOR AND VARIOUS INTERPOLATIONS

Wu Jindong Wang Futang

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

In view of the lower temporal resolution of general circulation models (GCMs) in assessing the impacts of climatic variation, the requirements of climatic variation scenarios and the studies on the potential implication of climatic variation, a stochastic weather generator WGEN is used to produce daily climatic variation scenario which also embodies possible climatic variability in Northeast China in accordance with commonly available information from GCMs. It could be applied to couple with climatic impact models, such as crop growth and development models in order to study the variation of crop growth and development and their yields, and possible impacts of variation of climatic variability.

Key words: Daily climatic variation scenario Stochastic simulation Interpolation