

吴金栋 王馥棠

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

简单回顾了气候变化对农业生产影响研究的进展, 分析了气候变化情景生成技术研究的必要性, 即影响模式与 GCMs 的嵌套困难及对气候变率和产量变率的认识。指出该技术是目前这一领域研究的关键所在。在此基础上, 阐述了气候变化情景的含义和要求, 介绍了常见的气候变化情景生成技术, 包括历史资料类比分析法、古气候资料重建与分析法、任意情景法、GCMs 输出法及天气发生器系统生成法等。并对每一种方法的使用范围、优点与不足, 特别是 GCMs 输出场的时空尺度解集技术及天气发生器的工作原理进行了详细分析。最后指出利用 GCMs 与随机天气模式、系统生成气候情景的方法, 是当前需大力深入研究的课题。

关键词: 气候情景 气候变率 GCMs 天气发生器

引 言

尽管气候变化问题还存在很大的不确定性, 对未来气候变化也只是一些粗略的估计, 但是气候变化对农业生产的影响研究, 在全球范围内方兴未艾, 并取得了大量的研究成果^[1]。从 70 年代主要针对以 CO₂ 为代表的温室气体 (GHGs) 的试验研究, 到 80 年代初 Rosenberg, N. J. 提出 CO₂ 浓度升高对农业生产的直接效应和间接效应^[2,3]后, 许多人采用统计回归方法, 研究气候变化对农业气候资源及其利用率、种植制度、作物区域布局、土地利用面积、农田管理措施以及对农作物病虫害、杂草流行程度等的影响^[4]。80 年代初中期, GCMs (大气环流模式) 研制成功, 并发表了大量的模拟结果, 从而使得 GCMs 与作物模式嵌套, 研究气候变化对作物生长发育和产量形成的影响成为可能。由于 GCMs 可以直接输出与温室气体浓度增加有关的结果, 能够提供变量较为齐全、时空尺度系统的

资料, 而作物模式的发展已相对较为完善, 能够模拟作物光合、呼吸、形态建成和产量收获等一系列生理、生态过程, 因此这一方法很快成为气候变化对农业影响研究的首选方法。美国能源部 (EPA) 1989 年采用该方法, 并计入 CO₂ 的直接效应和简单的农业适应性对策, 在地区水平给出了影响结论^[5]。该项研究是该方法的代表, 也是目前规模最大的影响研究之一, 标志着这一方法就其思路而言已较为成熟。

1 气候变化情景生成技术研究的必要性

为了估算气候变化对农业的可能影响, 必须定量地表示气候变化本身, 以便作为作物模式的输入。但是由于气候变化影响问题本身的复杂性, 目前模式研究中还有许多不完善的地方, 特别是由于 GCMs 存在许多严重的局限性, 包括时空分辨率低, 不能在区域和逐日尺度上给出可靠的模拟结果, 而作物模式需要输入具体的站点和逐日资料, 使得

GCMs 在农业影响研究中的应用受到限制。自 1985 年 Santer, B. 较早地开展 GCMs 与作物模式的嵌套试验以来^[6], 近 10 年的研究与以前的结论基本上没有本质上的改变。以 EPA 为代表的影响研究都将低分辨率的 GCMs 输出直接输入高分辨率的作物模式, 忽略了模式之间时空尺度的不匹配问题^[5], 这样产生的气候变化情景使得影响研究的结论难以得到合理的解释。因此, 如何生成既合乎情理, 又能作为作物模式输入的气候变化情景成为当前气候变化对农业影响研究的关键所在。

另一个使得采用何种方法生成未来气候变化情景愈来愈引起关注的原因, 是对气候变率及其影响认识的加深。气候变率指在几十年的时间尺度上, 静态气候系统围绕平均值的随机振动方式。气候变率的变化指在平均气候变化以后, 新的平均状态上的振动方式的变化。大量研究表明, 气候平均值的变化与气候变率的变化之间有一定的关系。然而, 在现有的技术水平下, GCMs 不能提供气候变率变化的可靠信息, 而气候变率的变化所引起的极端天气事件的频率、强度和持续时间, 比气候平均状况的变化更能影响作物正常的生长发育。比如, 气温变率的变化可影响植株的净光合效率和发育速率等生理过程; 同时, 热量条件的改善可能被降水变率的变化所抵消, 从而缩短了实际生长季, 导致最终产量和产量变率的变化。因此, 综合研究未来气候变化对农业生产的影响, 在气候变化情景中, 不能不包含气候变率变化的信息。然而, 以往的研究大都是在假设未来变率不变的前提下进行^[6], 这往往低估了气候变化对农业的影响。

最后, 在一定的气候背景条件下, 作物的生长发育更大程度上是受天气条件的影响, 而不是气候条件的影响。大多数现有的研究只给出了对未来气候的估计, 对于包含在该

气候估计内的各种天气过程缺少研究, 因此不能用来评估未来产量的变率(这往往是很意义的)。

基于以上原因, 进入 90 年代以后, 气候变化对农业的影响研究更加注重于气候变化情景的生成技术研究。

2 气候变化情景的含义和要求

2.1 气候变化情景的含义

气候变化情景(简称气候情景)是建立在一系列科学假设基础之上的, 对未来气候状态时间、空间分布形式的合理描述。由于目前不能精确地预测气候变化, 做为对未来气候的估计, 即使最佳的气候情景, 也有许多限制条件, 因此, 它主要用于气候变化影响的敏感性分析, 而不能做为对未来气候的预报, 不能试图设置一定的保证概率。

2.2 气候变化情景的要求

气候变化情景做为输入条件, 是一切影响研究的起始点。科学的气候变化情景必须满足以下要求^[5]:

(1) 气候情景能反映当前气候系统的物理机制, 各气候要素的变化应互相一致, 区域变化应与大尺度变化一致。否则不能解释未来气候的变化。

(2) 由于引起气候变化的人为因子, 不仅仅是温室气体浓度增加, 因此气候情景应包括所有重要的人为强迫, 而不单是温室气体浓度的增加。

(3) 气候情景包含齐全的气候变量, 以满足影响研究的需要。

(4) 气候变量的时空尺度要足够影响分析。气象要素同一平均值的不同时空分布形式, 比如总降水量相同, 降水强度和雨季长度不同的降水过程, 对农作物的影响截然不同。

(5) 气候情景估计的气候变化的范围要广, 以解释可能的强迫影响和用于分析模式的灵敏度, 确定重要的影响参数。

3 气候变化情景的生成技术

90年代以来,根据气候变化影响研究的需要和气候情景的要求,已开展了大量的有关气候变化情景生成技术的研究^[4,6,7]。常见的方法主要有:历史资料类比分析、古气候资料重建与分析、任意情景设置、GCMs 输出和天气发生器系统生成等5种方法。

3.1 历史资料类比分析

根据有气候资料记录以来的气候变化状况,选取有短期影响意义和异常天气事件,或明显的冷暖期,与当前气候进行对比、相关分析,建立未来气候的变化情景。由于历史气候记录序列短、统计关系不能外推;该时期的气候变化只是气候的自然变化,而非温室气体强迫所致、增温幅度小等原因,使用不同时段的气候(平均气候状况相同,而变化原因不同)类比,可产生完全不同的气候要素分布,得出不同的影响结论。

3.2 古气候资料重建与分析

通过考察地质时期古气候的变迁,并与现代气候的类比分析,以建立未来气候变化的可能情景。经常采用的三个时期是:完全新生代中期(5000~6000年前)、最后一次间冰期(125000年前)和上新世期(三四百万年前)。北半球气温分别比现在高1℃、2℃和3~4℃。该方法存在以下不足:

(1) 古气候与现代气候的边界条件不同;

(2) 古气候的变迁可能是太阳轨道参数发生变化的结果,而不是温室气体强迫所致;

(3) 古气候的重建质量不确定,分辨率低;

(4) 古气候的变迁中不含有气候变率变化和极端天气事件频率变化的信息。

以上不足使这种气候情景生成方法的使用受到一定限制。

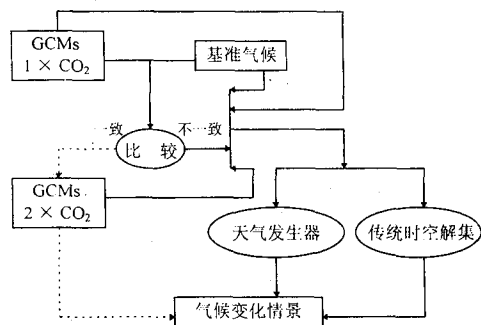
3.3 任意情景

在未来气候可能变化的范围内,任意调

整气候要素的变化,如年平均气温 ± 1 、 ± 2 、 ± 3 ℃...,年降水量 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 15\%$...,或不同要素的不同组合。用于不同影响系统的敏感性分析和模式性能检验,确定气候变化的上下限。由于各要素变化之间在物理上不一致,使用这种情景的结果往往是不现实的假设,导致了一系列不现实的结论。

3.4 GCMs 输出

由于GCMs可以输出变量较多、时空尺度齐全,并含有温室效应直接输入项的资料,能部分地解释当前气候系统的物理机制。因此,利用GCMs的输出结果,成为影响研究中最常采用的气候情景生成技术(附图)。目前GCMs可以提供两类气候情景:平衡试验情景和渐变试验情景,二者都是通过对基准气候的调整得到的。



附图 基于GCMs的气候变化情景生成方法流程
虚线表示目前尚未实现的流程,实线表示已
经实现或正在研制的技术

但是目前GCMs的可靠性差,不能准确地模拟当前气候,GCMs控制试验与观测值之间存在一定差异;不同模式在同一网格上的气温、降水差异,甚至比两种试验(1×CO₂与2×CO₂)之间的差异还大;模式分辨率低,时间分辨率最高为月,空间分辨率最高也只有200km²。IPCC认可的GCMs输出的2×CO₂时,全球年平均气温升高1.0~3.5℃,

在区域尺度上差异明显。而作物模式需要高分辨率的输入资料,以模拟一些重要的生理过程,使得 GCMs 不能完全满足气候变化对农业影响研究的需要。因此,GCMs 输出结果的修正、时空尺度的解集,即 GCMs 与作物模式的嵌套技术研究成为这一方法的关键所在。目前常采用的方法有:

3.4.1 空间尺度解集

(1) 直接使用 GCMs 大网格输出资料,取站点所在网格的中心值,作为该研究点的气候情景值。显然,两个有相似基准气候的站点,因在不同的网格中,会有非常不同的气候情景。

(2) 直接读取距离研究点最近网格点的输出值^[5]。

(3) 利用几个 GCMs 合成的网格情景^[5]。由于 GCMs 输出结果的差异也会产生同(1)的问题。

(4) 利用同一 GCMs 邻近几个网格点的输出进行线性或非线性插值^[7]。实际上,因地形因子等原因,精确的插值往往没有意义。

(5) 建立 GCMs 大网格要素与局地观测气候的统计关系,包括多元线性回归、典型相关分析、经验正交函数展开等。利用这些关系推算局地气候的未来情景。Kim, J. M. 等 1984 年首先提出该方法^[8],其中利用了气温、降水季节循环的空间分布,后经 Wigley, T. M. L., Karl, T. R. 等人的发展^[9,10],在回归方程中引入了大气环流形势因子。然而,由于假定气候要素在小网格尺度上的空间分布不变、统计关系不含有未来气候变率变化的信息以及 GCMs 在网格点上输出的不可靠,该方法的使用面临困难。

(6) 利用 LAM(Limited Area Model)在 GCMs 的一个有限区域内提高分辨率,输出该区域的模拟结果,从而在所研究的区内得到高分辨率的气候变化情景,做为作物模式的输入。该方法直接从 GCMs 入手,无疑是

很有前途的。但是有人为 LAM 的边界条件仍然取自于 GCMs 不准确的低分辨率输出而担忧。

3.4.2 时间尺度解集

(1) 不计气候变率的变化,在当前气候要素的逐日值上,直接加上 GCMs 输出的气候变化项。这是传统的时间尺度转化技术,并得到广泛应用^[6],但无疑存在严重的不足。

(2) 计 GCMs 输出的月值为月中值,进行线性内插。

(3) 利用三角二项式插值^[11],将 GCMs 的输出场内插到作物模式要求的时间尺度上。

3.5 天气发生器系统生成

利用统计学技术和各气候要素时间序列的统计结构,构建气候要素的随机过程,并结合 GCMs 大尺度网格上输出要素的月值和年值,调控逐日随机过程的参数,生成 $2 \times \text{CO}_2$ 的渐变或平衡气候情景(附图),其中的时空尺度可以满足影响研究的需要,从而避开了 GCMs 输出的时空尺度解集问题。这种方法还具有的优点之一是不仅产生气候平均值,而且可以任意调整气候变率,生成任意长度的时间序列,用于研究气候变率的变化对农业的影响。因此,利用天气发生器系统生成气候情景的方法成为目前气候变化影响研究的热点之一。

现有的众多的天气发生器,起初是为克服气候资料序列短,变量不齐全,为一些模式提供系统的气候资料输入而设计的用于模拟当前气候的随机模式。

近年来,由 Richardson 构建的 WGEN 模式在气候变化的影响研究中较为流行^[12,13],但是它的一些统计特征还不十分清楚。WGEN 能够模拟逐日降水量、最高气温、最低气温和太阳辐射。模式首先模拟晴雨序列,表示为

$$\{J_i; i = 1, 2, \dots\} \quad (1)$$

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(Markov Chain)。降水能否出现,仅取决于前一天有无降水发生。该过程由雨日频率参数 π 和降水持续参数 d 唯一确定。

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

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

降水量的变化以 Γ 分布描述。

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

其中 α 为形状参数, β 为尺度参数。其它非降水要素的模拟以降水的变化特征为条件,采用多变量一阶自回归过程拟合。

$$\{Z_i(j) | J_t = i; t = 1, 2, \dots\} \quad (5)$$

$i = 0, 1$ 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。模式中不仅考虑了各要素的自相关性,而且计入了要素之间的交叉相关特性,以保证各要素在物理上相互一致。模拟方法采用随机试验方法(Monte Carlo 方法)。

其它的天气发生器还有很多,如 Peiris 等的模式与 WGEN 相反^[14],首先模拟非降水要素,降水量是做为非降水要素的函数来模拟的。

尽管许多物理学家对随机天气发生器的使用提出了疑问^[15],但是大部分研究集中在这些发生器的工作原理和如何改进上^[13]。目前主要存在三方面的问题:一是生成的气候要素的变化在物理上,而不仅仅在统计上要求相互一致;二是各气候要素的统计结构还不十分清楚,或不易表达。如低频变化的信息没有在模式中反映出来,月平均气温和月总降水量的拟合方差比实测值要小^[15]。由此许多人建议采用高阶的马尔科夫过程和自回归方程;三是利用随机天气发生器生成气候情景的研究还不深入,目前还没有成熟的调控模式参数的方法。

目前主要的气候情景生成方法和流程可

如附图所示。由以上分析可见,提高 GCMs 的模拟精度是这些方法的共同要求。

4 小结

综上所述,未来气候变化情景生成技术的研究是当前气候变化影响研究的重要环节。常用的几种气候变化情景生成方法有各自的优缺点。虽然利用 GCMs 输出生成的方法得到了广泛的应用,但是由于 GCMs 的可靠性和分辨率等原因,无疑使得作物模式的输出难以令人信服。把随机天气发生器应用于气候情景的生成,近年来才引起重视,有相当的发展潜力。改进随机天气发生器的模拟能力,以产生更符合实际的复杂的气候变率的变化,并尝试与 GCMs 相结合的途径和方法,是今后需大力深入研究的课题。这必将有力地促进气候变化对农业生产的影响研究。但是同时不能忽视的是作物模式的进一步改进和完善。比如对光合作用与贮存生物量之间的反馈机制,不同生理过程之间的相互作用,作物生长发育与病虫害、杂草的竞争以及农业适应性对策的调控等重要过程的模拟。

参考文献

- 1 王复棠. 我国气候变暖对农业影响研究的进展. 气象科技, 1994, (4): 19~25
- 2 N. J. Rosenberg. The increasing CO₂ concentration in the atmosphere and its implication on agricultural productivity. I. Effect on photosynthesis, transpiration and water use efficiency. Climatic Change, 1981, 3: 265~279
- 3 N. J. Rosenberg. The increasing CO₂ concentration in the atmosphere and its implication on agricultural productivity. II. Effect through CO₂-induced climate change. Climatic Change, 1982, 4: 239~254
- 4 M. L. Parry. Climate Change and World Agriculture. Earthscan. London, 1990.
- 5 J. B. Smith et al. (eds). The Potential Effects of Global Climate Change on the United States. U. S. /EPA, 1989, EPA-230-05-89-050.
- 6 B. Santer. The use of general circulation models in climate impact analysis- A preliminary study of the impact

- of a CO₂-induced climate change on west European agriculture. Climatic Change, 1985, 7: 71~93
- 7 T. R. Carter et al. Climate Change: Preliminary Guidelines for Assessing Impacts of Climate Change. ECU/CGER, 1992.
 - 8 J. M. Kim et al. The statistical problem of climate inversion: Determination of the relationship between local and large-scale climate. Mon. Weather. Rev., 1984, 112: 2069~2077
 - 9 T. M. L. Wigley et al. Obtaining sub-grid-scale information from coarse-resolution general circulation model output. J. Geophys. Res., 1990, 95(D2): 1943~1953
 - 10 T. R. Karl et al. A method of relating general circulation model simulated climate to the observed local climate. Part 1: Seasonal statistics. J. Climate, 1990, 3: 1053~1079.
 - 11 CAgM Working Group/WMO. CAgM Report No. 17: Effect of Climate Variability on Agriculture and of Agricultural Activities on Climate. 1983.
 - 12 C. W. Richardson and D. A. Wright. WGEN: A model for generating daily weather variables. U. S. Dept. of Agriculture, Agricultural Res. Service, 1984, ARS-8, pp. 83.
 - 13 T. W. R. Wallis and J. F. Griffiths. An assessment of the weather generator (WXGEN) used in the erosion/productivity impact calculator (EPIC). Agric. and Forest Meteorol., 1995, 73: 115~133
 - 14 R. Peiris and J. W. McNicol. Modelling daily weather with multivariate time series. Agric. and Forest Meteorol., 1996, 79: 219~231.
 - 15 K. C. Young. A Multivariate chain for simulating climatic parameters from daily data. J. Appl. Meteorol., 1994, 33: 661~671.

Study on the Creation of Climate Change Scenarios for Impact Analysis: A Review

Wu Jindong Wang Futang

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

The Necessity for the study on creation of climate change scenarios is analyzed in the light of the simple review of the recent progress in the impact studies of climate change on agriculture, i. e. understanding of the difficulties in coupling General Circulation Models (GCMs) with impact models, and knowledge of climatic and crop yield variability. Consequently, future climate impact studies should become more focused on scenarios' construction in order to get the true results. The creating techniques of climate change scenarios, including historical instrumentally-based scenarios, paleoclimatic analogue scenarios, arbitrary scenarios, scenarios from GCMs' outputs and synthetically generated scenarios from Weather Generator (WGEN), etc. are elaborated as well as their implication, requirement, advantages, disadvantages and usage scopes. Especially, the down-scaling techniques in the GCMs-based scenarios and the fundamentals of WGEN are discussed in detail. This review addresses a promising method to produce reasonable climate change scenarios with a high spatial and temporal resolution by combining the information from GCMs simulation and WGEN, thus incorporating climatic variability either, and it should be developed in the future.

Key Words: Climate Change Climate Variability GCMs WGEN