

中国、北半球和全球的气温突变分析 及其趋势预测研究

魏凤英 曹鸿兴

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

本文采用均值差异假设检验研究了中国、北半球和全球气温历史序列的突变现象。分析表明, 中国气温从本世纪以来, 在 40 年代末 50 年代初曾出现一次由暖到冷的突变。北半球和全球均曾在 19 世纪末和本世纪 20 年代发生了突变现象。功率谱分析表明, 气温的突变指数曲线具有明显的周期性。一系列比较研究证明, 按照分析出的突变点将气温序列分段建模, 无论数值误差还是变化趋势, 效果均优于整段序列的模型。所以, 对未来气温变化趋势作预测, 应首先搞清楚未来会处在怎样的气候阶段中, 会不会出现突变。研究表明, 本文叙述的均生函数累加延拓的时序建模方案, 对气温序列有很好的拟合和预测效果。

关键词: 突变; 趋势预测; 均生函数。

一、引 言

80 年代以来, 全球和北半球的气温出现了本世纪以来最明显的上升趋势, 我国气温也呈回暖趋势。因此, 全球性气候变暖已成为当今气候学研究的一个热门课题。近年来, 在研究气候变化规律时, 人们开始注意对可能存在的气候突变现象的研究, 并已揭示出一些突变事实^[1-5]。在研究影响气候变暖因素的同时, 也开展了对未来气温变化趋势预测的研究。主要通过数值模拟研究温室气体的气候效应, 以此对气温趋势作出估计。也有学者根据气候变化的自然振荡、太阳活动、火山活动及行星运动对未来气温变化作出预测^[6]。

我们认为: 要预测未来气温变化趋势, 首先应弄清楚气温变化的历史、特点及变化规律, 还要弄清楚目前及未来预测时段处在怎样的气候阶段中, 历史上是否出现过突变现象, 今后什么时候还会出现? 只有这样才能建立相对稳定、预测效果好的模型。

基于上述想法, 本文首先研究了中国、北半球和全球气温序列的突变现象, 对计算的突变指数进行了分析。利用一种称为均生函数累加延拓的时序模型拟合气温序列的上升或下降趋势, 并进行了一系列预测试验。

二、气温变化的突变分析

1. 资料

中国气温序列取 1910—1990 年全国年平均气温等级^[7]序列(见图 1a)。这一序列是

由全国有代表性的 139 个站点等级值平均得到的。气温等级值分 5 个等级: 1 级表示暖; 2 级偏暖; 3 级正常; 4 级偏冷; 5 级冷; 即等级值高表示气温低, 等级值低表示气温高。北半球和全球序列用 P. D. Jones 等提供的 1861—1988 年的年平均气温距平序列 (见图 1b、c)。以下建模和预测均使用这 3 个序列。

2. 突变分析方法

采用均值差异假设检验来确定气温变化的突变。若一序列某一时段的平均值与另一时段平均值之间差异具有充分的统计显著性, 则认为在给定的信度范围内, 该系统在选定的时间点上出现了突变现象^[1]。

定义样本长度为 N 的序列的突变指数

$$AI_j = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{(S_1 + S_2)}, \quad (1)$$

式中 $\bar{x}_1$ 和 S_1 为基准年前 M 年时间段的平均值和标准差, $\bar{x}_2$ 和 S_2 为后 M 年时间段的平均值和标准差。计算时采用连续设置基准年的方法, 从而得到突变指数 AI_j 的时间序列。基准年 M 根据具体问题通过试验主观设定。

定义统计量

$$t_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_p \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{1/2}}, \quad (2)$$

M_1 和 M_2 为前后两段序列样本长度, S_p 是联合样本方差, 即

$$S_p = \frac{(M_1 - 1)S_1^2 + (M_2 - 1)S_2^2}{M_1 + M_2 - 2},$$

其中 S_1 和 S_2 为两段序列的方差。

这里如果假定 $M_1 = M_2 = M$, 比较 (1) 和 (2) 式得

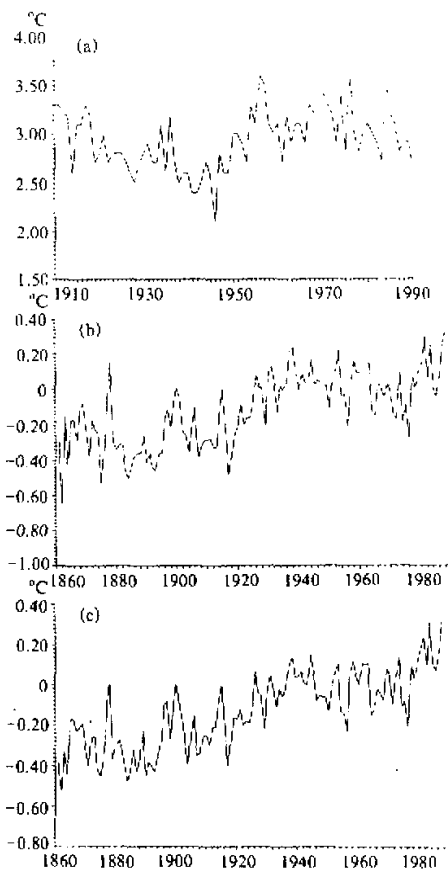


图 1 中国(a)、北半球 (b) 和全球 (c) 气温变化曲线

$$t_0 > AI_j \sqrt{M}.$$

若平均时段 M 取 10, $AI_j > 1.0$ 相当于 $t_0 > 3.162$, $t_\alpha = t_{0.01} = 2.878$ 即 $t_0 > t_\alpha$, 达到 99% 以上信度的水平, 说明第 j 年前时段的均值与第 j 年后时段的均值有显著性差异, 即发生了突变。显然, $AI_j > 2.0$ 相当于 $t_0 > 6.324$, 达到 99.99% 信度以上的水平, 认为有强突变发生。达到信度的 AI_j 可能连续出现在数年区间内, 我们取这一区间中最大 AI_j 的年份作为突变出现的时间, 这意味着在第 j 年附近的几年内气温状态发生了最大的趋势变化。

这一检测气候突变的诊断方法与其它方法相比其最大优点是能简单且直观地确定突变。它的缺点是平均时段 M 的选择带有人为性。为避免人为地选择 M 值造成的突变点漂移, 我们在具体计算时, 反复变动 M , 例如取 30、25、20、15、10、5 等, 进行试验比较, 以提高计算结果的可靠性。

3. 气温序列的突变事实

从图 1 中看出, 中国、北半球和全球气温变化趋势是基本相同的。它们发生突变的时段是否也一致呢? 计算时 M 为 30、25、20、15、10 年的结果指出, 中国气温序列在 1948—1953 年间突变指数均超过 99% 显著性水平, 且最大值大都出现在 1949—1950 年间。北半球和全球气温序列的突变指数的变化大体是一致的。在 M 取 30、25、20、15 年时, 从 1920—1921 年开始到 1926—1927 年突变指数达到 99% 显著性水平, 且最大值大多出现在 1925—1926 年间。这两个序列 M 取 10 年时, 除在 20 年代有突变点外, 在 1883—1884 年间至 1896—1897 年间的突变指数也超过了 99% 显著性水平, 其中北半球的最大值在 1893—1894 年间, 全球序列的最大值在 1895—1896 年间。在 M 取 5 年时, 中国气温序列除上述 40 年代末 50 年代初的突变点外, 在 1966—1967 年间又有一次显著突变点出现。北半球和全球也分别在 1963—1964 年间和 1978—1979 年间各有一次突变指数超过 99% 显著性检验。

从上述计算结果可见, 取不同长短的平均时段作出的气候突变事实是有差异的。但是, 所揭示的显著突变是一致的, 且突变指数最大值出现的年份也基本相同。从计算结果可以确定在 1949—1950 年间中国气温曾出现过一次显著的突变。从图 1a 中可以看出, 中国气温由 40 年代的明显增暖转为降温, 从 3 个序列的突变指数分析, 这种降温趋势远比北半球和全球激烈, 是近百年来最为显著的一次突变。北半球和全球气温突变指数变化趋势基本一致, 本世纪 20 年代初 (1920—1921 年间) 突变指数开始达到显著性水平, 到 1925—1926 年间达到最大值。这一结果与符崇斌等人^[4-5]用 Mann-Kendall 法检测的结论一致。平均时段 M 取 10 年和 5 年时, 北半球和全球序列均在 1893—1894 年间至 1896—1897 年间突变指数达到 99% 显著性水平, 而且北半球序列在 1893—1894 年间, 全球序列在 1895—1896 年间突变指数远远超过 99% 显著性水平, 我们以此确定上世纪末曾出现过一次较显著的突变, 即经历过一次由冷到暖的转变。这一结果也有其它工作可以证实^[6]。用平均时段 5 年计算出 60 年代北半球和全球曾有过突变现象出现, 严中伟等人分析 1951—1980 年北半球气温得到过相同的结论。

60 年代北半球和全球气温有所下降,但未达到上世纪 90 年代突变前的低温水平。按这个平均时段计算 70 年代末又出现了一次突变,即气温又迅速回升,且升温趋势更加明显,这就最终变化到 1990—1991 年的全球高温。因此,可以把 60 年代的这次突变看作是从 20 年代以来升温趋势的一次小波动,用较大时间尺度衡量它是不显著的。

综合上述分析,我们认为平均时段取 10 年的突变指数是可靠的,与序列长度的比例也适中。图 2a—c 分别给出中国、北半球和全球的突变指数变化曲线。由图可以更清楚地看出,中国气温序列的突变点为 1949—1950 年间;北半球气温序列的突变点是 1893—1894 年和 1925—1926 年。全球的突变点是 1895—1896 年和 1925—1926 年。由此可以得出结论:中国、北半球和全球的气温变化趋势基本相同。但冷、暖转折的时期,即出现显著突变的时期中国与北半球和全球的情况就有明显的不同。

4. 气温突变的周期性

为考查突变指数序列的特征,对平均时段为 10 年的 3 个突变指数序

列分别进行了功率谱分析。表 1 给出超过 99% 置信限的显著周期。从表 1 看出,中国、北半球和全球的突变具有明显的周期性,变化规律也大致相同,均存在 32 年的主周期。北半球和全球气温突变指数,除有 32 年显著周期外,还存在 21.3 和 64 年的周期。

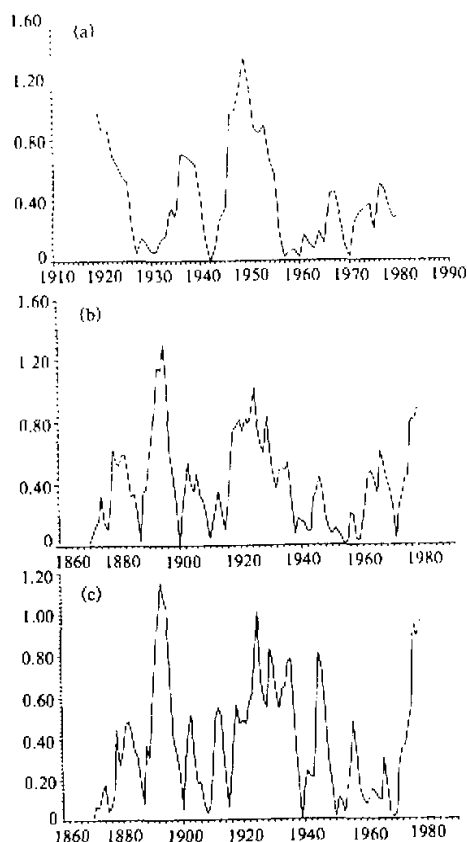


图 2 中国(a)、北半球(b)和全球(c)
突变指数变化曲线

表 1 突变指数的显著周期

	显 著 周 期 (年)			
中 国	32.0	16.0		
北半球	32.0	21.3	64.0	12.8
全 球	32.0	21.3	64.0	

三、气温变化趋势预测研究

1. 建模方案及实施步骤

根据气温变化的特点及预测要求,设计了一个旨在较准确模拟气温上升或下降趋势的建模方案。它具有以下特点:(1)由于引进了均值生成函数(简称均生函数)的累加延拓序列作为预报因子,因此,可以较好地拟合气候变化的上升或下降趋势;(2)引进顾及与数值和趋势的双评分准则筛选预报因子,以建立拟合精度高,趋势亦准的预测模型;(3)构造均生函数延拓序列,使所建模型能够外推较多步数,适于制作长期和气候预测^[8]。

建模步骤简述如下:

(1) 构造均生函数及累加延拓序列

设有 N 个观测样本的气温序列

$$x^{(0)}(t) = \{x(1), x(2) \cdots x(N)\}, \quad (3)$$

考虑差分是高通滤波中最简便的滤波方式,对(3)式作一、二阶差分运算,得到

$$\begin{cases} x^{(1)}(t) = \{\Delta x(1), \Delta x(2) \cdots \Delta x(N-1)\}, \\ x^{(2)}(t) = \{\Delta^2 x(1), \Delta^2 x(2) \cdots \Delta^2 x(N-2)\}, \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\Delta x(t) = x(t) - x(t-1)$, $\Delta^2 x(t) = \Delta x(t) - \Delta x(t-1)$ 。

对序列 $x^{(0)}(t)$, $x^{(1)}(t)$ 和 $x^{(2)}(t)$ 分别计算均生函数,即

$$\bar{x}_l(i) = \frac{1}{n_l} \sum_{j=0}^{n_l-1} x(i+jl), \quad i=1, \cdots, l; \quad l=2, 3, \cdots, M \quad (5)$$

$n_l = \text{INT}(N/l)$, $M = \text{INT}(N/2)$ 或 $\text{INT}(N/3)$, 这里 INT 表示取整。对得到的均生函数作周期性延拓,即

$$f_l(t) = \bar{x}_l \left[t - \text{INT} \left(\frac{t-1}{l} \right) \right].$$

于是,得到 3 组均生函数序列 $f^{(0)}$, $f^{(1)}$, $f^{(2)}$, $l=2, 3, \cdots, M$ 。

再构造一组累加延拓序列,

$$f_l^{(3)}(t) = x^{(0)}(1) + \sum_{i=1}^{t-1} f_l^{(1)}(i+1), \quad t=2, 3, \cdots, N; \quad l=2, 3, \cdots, M \quad (6)$$

其中

$$f_l^{(3)}(1) = x^{(0)}(1)$$

至此,构造出 $q = 4 \times M$ 个序列作为备选因子。

(2) 粗选因子

用双评分准则^[8]对 q 个预报因子逐一进行筛选。当双评分准则 $CSC > \chi_{v,\alpha}^2$ 时,因子入选,否则剔除。这里 α 取 0.01, v 为自由度。

(3) 建模

设粗选出 $P(P < q)$ 个因子, 按其 CSC 值由大到小排列, 用前向筛选逐个引入方程。为避免回归系数的重复计算, 对粗选出的 P 因子序列先进行 Gram-Schmidt 正交化。假设方程引进 S 个因子后, CSC 出现极大值, 即确定预测模型由 S 个因子建立。

建模详细方法和步骤有另文讨论, 这里不再赘述^[9]。

2. 气温序列的拟合和预测

人们期望了解未来气温变化是继续增暖还是下降; 增暖或下降的程度如何? 近期会不会出现突变? 这是预测模型要回答的关键问题。因此, 检验统计模型的效果要用拟合的均方根误差是否小、变化趋势是否对、突变点是否可以拟合和预测出来等指标衡量。为此, 我们做了一系列比较研究。

(1) 整段资料建模拟合结果分析

用 1910—1990 年 81 年中国气温和 1861—1988 年 128 年北半球和全球气温序列分别建模, 对原序列进行拟合。拟合序列的均方根误差和原序列的标准差列在表 2。

表 2 拟合序列的均方根误差和原序列的标准差

	均方根误差	标准差
中 国	0.20	0.304
北半球	0.11	0.204
全 球	0.088	0.191

从表 2 看出, 拟合序列的均方根误差小于原序列标准差, 可见模型拟合的精度是理想的。

模型是否可以拟合出气温变化的突变现象? 为此, 分别计算了 3 个拟合序列平均时段为 10 年的突变指数, 按 $AI_j > 1.0$ 定为突变点。表 3 给出确定的原序列及拟合序列的突变点。中国气温拟合序列出现了两次突变, 且年份与实际发生突变的年份不符。北半球和全球的拟合序列前两次出现的突变年份与原序列基本一致, 但 1951—1952 年多出现了一次突变。由此可见, 所建中国气温的预测模型没有很好地模拟突变现象。尽管北半球和全球的气温模型较好地揭示了两次突变, 但又多拟合出 50 年代初的一次突变, 说明模型对近几十年气温变化的拟合是不理想的。

表 3 原序列和拟合序列突变点

	原序列突变点	拟合序列突变点
中 国	1949—1950	1919—1920, 1928—1929
北半球	1895—1896, 1925—1926	1893—1894, 1925—1926, 1951—1952
全 球	1893—1894, 1925—1926	1893—1894, 1925—1926, 1951—1952

(2) 分段建模拟合结果分析

针对用整段资料建模对突变点拟合存在的问题, 将气温序列按突变点分段, 再分别建模。中国气温序列分为 1910—1949 和 1950—1990 两段, 分别记为中国-1 和中国-2, 对北半球和全球序列类推。北半球分为 1861—1895, 1896—1925 和 1926—1988

三段;全球分为 1861—1893, 1894—1925 和 1926—1988 三段。表 4 给出各段序列的拟合均方根误差和原各段标准差。从表中可见,分段建模的均方根误差远小于原各段序列的标准差,更低于用整段资料建模的拟合均方根误差。

表 4 拟合均方根误差和原各段序列标准差

	均方根误差	标准差
中 国-1	0.11	0.28
中 国-2	0.16	0.25
北半球-1	0.089	0.15
北半球-2	0.085	0.12
北半球-3	0.066	0.13
全 球-1	0.067	0.12
全 球-2	0.075	0.10
全 球-3	0.062	0.12

将分段拟合序列连接起来作突变分析。3 个气温拟合序列确定的突变点的年份与原序列完全相同,显然这是意料中的。

(3) 预报效果比较

从上述分析比较可知,按照气温变化的不同阶段建模拟合效果是令人满意的。那么,模型的预报能力如何呢?以 3 个气温的第一段序列为例作比较分析。表 5 给出这 3 段模型作 3 年预报的结果及与实况的比较。

表 5 预报值、实况值及平均绝对误差

	预报年份	预报值	实况值	平均绝对误差
中 国-1	1950—1952	2.3 2.4 2.5	3.0 3.0 2.9	0.60
北半球-1	1896—1898	-0.20 -0.52 -0.50	-0.17 -0.11 -0.21	0.24
全 球-1	1894—1896	-0.43 -0.41 -0.36	-0.35 -0.29 -0.10	0.22

从表 5 实况值一栏看出,1950—1952 年中国气温呈下降趋势(等级值高表示气温低),而预报值的气温偏高,趋势相反,平均绝对误差也较大。北半球 1896—1898 年的预报值虽然与实况的符号一致,但数值误差较大,全球也是类似。由此可见,要准确地预报与建模所用资料不属于同一气候阶段的气温是很困难的。

用上述 3 段序列,分别留出 5 年作为试报年,验证模型预报属于同一气候阶段的效果。试报结果见表 6。从表中看出,3 段预报的趋势与实况基本一致,平均绝对误差比表 5 中的误差减小了近两倍,与表 4 所示的拟合均方根误差接近。

表 6 试报值、实况值及平均绝对误差

	预报年份	预 报 值	实 况 值	平均绝对误差
中 国-1	1945—1949	2.5 2.4 2.4 2.4 2.3	2.6 2.1 2.8 2.6 2.6	0.26
北半球-1	1891—1895	-0.46 -0.46 -0.48 -0.54 -0.41	-0.36 -0.44 -0.46 -0.36 -0.36	0.074
全 球-1	1889—1893	-0.42 -0.26 -0.41 -0.43 -0.44	-0.22 -0.45 -0.38 -0.40 -0.43	0.088

上述比较表明, 预测的时段与建模资料为同一气候阶段时, 本文所述的建模方案可以取得较好的预测效果, 否则很难收到满意的结果。因此, 要做未来气温预测, 首先必须弄清楚欲预测时段会不会出现突变, 若不出现, 模型所作的预测就有较大可靠性。若可以外推出某时刻有可能出现气温突变, 就认为突变以前时段的预报是可信的, 这样就确定了所建模型的可预报长度。当然, 突变点的预测比气温预测更困难。

四、小 结

(1) 中国、北半球和全球的气温变化趋势基本相同, 但突变分析结果表明, 中国与北半球和全球出现突变的时期却不相同。本世纪以来, 40 年代末 50 年代初中国气温曾出现过一次最明显的突变现象, 即从 40 年代的增暖转为降温且至今仍为冷期阶段。这与北半球和全球的情况不同, 尽管 80 年代以来气温在回升, 但仍低于近百年平均。北半球和全球气温两者发生突变的时期是一致的, 均在 19 世纪 90 年代和本世纪 20 年代发生了突变。20 年代从负距平转为正距平, 尽管 60 年代和 70 年代末有过较小的振动, 但大趋势一直维持上升不变。功率谱分析揭露, 3 个气温序列的突变指数具有明显的周期性。气温突变事实的揭露, 不但有助于我们了解气候系统的行为, 且为建立气候突变模型提供了必要的根据。

(2) 一系列试验表明, 用处在不同气候阶段的气温序列建立预测模型, 不能准确地拟合气温变化发生的突变现象。按照分析出的突变点分段建模, 无论数值误差还是变化趋势均优于整段序列的模型。

(3) 由预报比较分析可知, 若待报时段与建模所用资料不属同一气候阶段, 预报不能收到好的效果。相反, 待报时段与建模资料处于同一气候阶段则效果理想。这一结果提示我们: 做未来气温预测, 必须首先弄清楚待报时段是否与现在处于同一气候阶段, 会不会出现突变。

(4) 假定气温变化呈周期性, 巧妙地构造其自身及差分序列的均生函数, 引进累加延拓序列, 着重考虑趋势的拟合和预测, 这一新颖的建模思路对于模拟上升或下降趋势的气候序列有实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] Yamamoto, R., T. Iwashima and N. K., Sanga, 1986, An analysis of climatic jump, *Meteor Soc. Japan*, 64, No.2, 273—281.
- [2] Berger W.H. and L.D. Labeyrie, 1987, *How to Recognize an Abrupt Climatic Change? Abrupt Climatic Change—Evidence and Implication*, D. Reidel Publishing Company, 36—45.
- [3] 严中纬等, 1990, 60 年代北半球夏季气候跃变, *中国科学, B 辑*, 1 期, 97—103.
- [4] Fu Congbin, Henry, F., Diaz and Fletcher, J.O., 1989, The changes of atmospheric circulation over northern hemispheric oceans associated with the global abrupt warming of the 1920s presented at seminar of CIRES, University of Colorado, Boulder.
- [5] 符淙斌、王强, 1992, 气候突变的定义和检测方法, *大气科学*, 16(4), 482—493.
- [6] 国家科学技术委员会, 1990, 中国科学技术蓝皮书——气候, 科学技术文献出版社, 148—155.
- [7] 天气气候所、中央气象台, 1984, 中国气温等级图, 气象出版社.

[8] 魏凤英、曹鸿兴, 1990, 长期预测的数学模型及其应用, 气象出版社, 29—36.

[9] 曹鸿兴等, 1993, 多步预测的降水时序模型, 应用气象学报, 4(2), 198—204.

Detection of Abrupt Changes and Trend Prediction of the Air Temperature in China, the Northern Hemisphere and the Globe

Wei Fengying and Cao Hongxing

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Abrupt changes of yearly air temperature series in China, the Northern Hemisphere and the Globe are detected with a statistical test in this paper. It turns out that an abrupt change from a warm period to a cold one of the temperature in China occurred during the end of the 1940s and the beginning of 1950s, and two abrupt changes of the temperature in the Northern Hemisphere and the Globe also happened both in the 1890s and the 1920s. Meanwhile, it is found that the abrupt change indexes of the three temperature series have significant periodicity. The results of predictions for independent observations show that the models upon several periods, which are divided from the temperature series by the points of the abrupt changes, are far better than the model upon the whole temperature series, having examined the quantity, the change trend of the fitting and prediction. Therefore, when we predict the temperature in the future the first priority is to detect the climate period, to which the future climate will be transferred, and the abrupt change, which will be occurred or not. Our work indicates the modeling scheme based on integrating extension series of the mean generating function is feasible for the simulation and prediction of the temperature series.

Key words: abrupt changes; trend prediction; mean generating function.

书 讯

《气候动力学引论》出版

当代气候研究已进入了一个新的时期, 其重要特点是在观测资料分析的基础上进行大量动力学机制研究和数值模拟试验。气象出版社今年出版了李崇银编著的《气候动力学引论》, 该书作者把近年来的研究成果工作成果同国内外一些新进展相结合, 全面、系统地论述了气候动力学的基本问题, 对引导人们探索和认识气候变化的特征、规律和动力学理论会起一定的作用。

《气候动力学引论》全书约 70 万字, 分为 12 章, 它们是: 1. 绪论, 2. 气候系统, 3. 大气辐射过程, 4. 大气季节内振荡的动力学, 5. 大气环流持续异常——阻塞形势的动力学, 6. 大气环流持续异常——遥相关的动力学机理, 7. 海洋—大气相互作用, 8. 陆—气相互作用, 9. 气候数值模拟——大气环流模式, 10. 气候数值模拟——简化模式, 11. 可预报性问题, 12. 人类活动与气候变化。

《气候动力学引论》的突出特点是: 资料分析与理论和数值模拟相结合, 对当代气候及其变化的动力学机理进行了系统阐述和讨论。该书既适合广大气象科技工作者尤其是从事气候工作的人员阅读, 也适合大气科学有关专业研究生学习, 还可供与气候变化有关的海洋、地球物理、地理和生态环境等学科的科研人员和教师参考。

(柯 季)