

汤懋苍 赵红岩 张存杰 等著

# 地气图预测气候变化的 原理和方法(上)

气象出版社

# 地气图预测气候变化的原理和方法（上）

汤懋苍 赵红岩 张存杰 著  
高晓清 郭维栋

气象出版社

## 内 容 简 介

本书提出地球系统运转的动力根本上源自地核环流。宇宙磁场通过“变压器效应”，引起地外核环流变化。它操纵着地球表层的各种变化（全球变化），也是气候变化的根本原因。“宇地磁耦合假说”较圆满地解释了30亿年来地球大旋回（ $10^8$ 年）的原因，也解释了高原隆起与夷平的原因（ $10^7 \sim 10^5$ 年）及与其相连的季风系统的演变，亦可解释 $10^4$ 年气候变化的原因，避免了“米氏理论”的窘境。 $10^3 \sim 10^1$ 年的气候变化与太阳磁场（黑子周长是其衡量指标）关系非常密切，这也符合“宇地磁耦合假说”。由于地壳和地幔对短波磁场的强屏蔽作用，使 $10^0 \sim 10^{-1}$ 年的气候变化与宇宙磁场几乎无直接关系。此时，地核环流通过地幔热柱等通道向上传到地幔的波动，操纵着“地热涡”等气候系统而促使短期气候发生变化。

### 图书在版编目（CIP）数据

地气图预测气候变化的原理和方法. 上/汤懋苍等著.  
北京：气象出版社，2007.2  
ISBN 978-7-5029-4279-3

I. 地... II. 汤... III. 气候变化—预测—研究  
IV. P467

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 007684 号

气象出版社出版

（北京中关村南大街 46 号 邮编：100081）

网址：<http://cmp.cma.gov.cn> E-mail: [qxcbs@263.net](mailto:qxcbs@263.net)

责任编辑：章澄昌 陈 红 终审：黄润恒

封面设计：王 伟 责任技编：陈 红 责任校对：宋春香

\*

北京中新伟业印刷有限公司印刷

气象出版社发行

\*

开本：787×1092 1/16 印张：8.75 字数：224 千字

2007 年 2 月第 1 版 2007 年 2 月第 1 次印刷

定价：35.00 元

---

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等，  
请与本社发行部联系调换

# 序 言

余致力气候预测愈 40 年，其目的在求预报之准确、可用。积 40 年之经验，深知欲达此目的必需研究地气耦合（即大气圈与岩石圈的相互作用）及联合水圈、冰雪圈、生物圈与天文圈共同奋斗。

20 世纪 90 年代，本人曾多次想写一本关于“短期气候预测的地气图方法”的书，几次动笔均因觉得很多问题尚未研究透而停笔。到现在很多问题仍未研究透，但本人已年过古稀，时不我待，只好将这本尚不成熟的书奉献给读者，请予批评、指正。

本书分为上、下两册出版，上册介绍气候变化的原理，主要阐述我们的论点：气候变化的根本原因在于宇宙天体磁场与地球磁场的耦合作用（宇地磁耦合假说）。宇宙磁场通过“变压器效应”引起地核环流变化。它操纵着地球表层的各种变化（全球变化），是气候变化的根本原因。“宇地磁耦合假说”可以解释 30 亿年来地球大旋回（ $10^8$  年）的原因（2.4 节），也可解释高原隆升与夷平的原因（ $10^7 \sim 10^5$  年）及与其相伴的季风系统的演变（2.5 节），也解释了  $10^4$  年气候变化的原因，避免了“米氏理论”的窘境（2.6 节）。 $10^3 \sim 10^1$  年的气候变化与太阳磁场（黑子周长是其衡量指标）关系非常密切，这也可从“宇地磁耦合假说”得到解释（3.1~3.7 节）。 $10^0 \sim 10^{-1}$  年的气候变化与宇宙磁场几乎无直接关系，这是因为地壳和地幔对周期  $\leq 10^0$  年的短波磁场有强屏蔽作用。使短波磁场影响不到地核环流。此时地核环流中各种时空尺度的扰动，会通过“地幔热柱”（它相当于光学意义上的“小孔”），而上传到上地幔软流圈，在软流圈中形成各种波动的干扰、叠加、共振……使短期气候变化呈现出缤纷复杂的局面。目前可用于短期气候预测的岩石圈中的要素主要是地温和地震。第 4 章介绍了地温场结构与短期气候变化的关系，提出了地气耦合的概念模式图（图 4.14），认为地热涡、地冷涡、形变锋等是主宰短期气候变化的“地面气候系统”。描述地面气候系统演变的图表，被称为“地气图”。第 5 章讲述了地震场与降水场的关系，发现强地震是预测未来数月降水场分布的一个好指标。下册将介绍用地气图做短期气候预测的各种方法，包括年度、汛期、季度和月预测方法和预测结果，希望能对气候预报员们的工作有所帮助。

宇地磁耦合假说的核心内容之一是“变压器效应”，其首倡者是言穆弘教授。本书的第 2 章第 2 节即是言教授所写，在此对言教授表示诚挚感谢。本书也引用了曾是我的学生的大量研究成果，他（她）们是：董文杰、柳艳香、马柱国、卫捷、陈泽宇、胡泽勇、韦志刚、蔡英、范新岗、冯松、王钟睿、李超、王宝灵、胡宗海、周亚军、纪忠萍以及江灏、曾涛、朱德琴、张拥军、柳苗等，在此对他（她）们亦表谢意。

本书的出版得到了甘肃省气象局“十人计划”的资助，也得到了国家自然科学基金面上项目（课题号为：40675052 和 40405014）的资助，特表感谢。

汤 懋 苍

2006 年国庆节于兰州区域气候中心

# 目 录

## 序言

|                                                         |        |
|---------------------------------------------------------|--------|
| 第 1 章 绪论                                                | ( 1 )  |
| 1.1 气候系统与地球系统                                           | ( 1 )  |
| 1.1.1 全球气候系统的基本特征                                       | ( 1 )  |
| 1.1.2 运转地球系统的能源                                         | ( 2 )  |
| 1.2 气候变化时序的自然分段                                         | ( 3 )  |
| 1.3 关于气候系统行为的三个猜想                                       | ( 5 )  |
| 1.4 短期气候预测的历史回顾                                         | ( 6 )  |
| 1.4.1 经验方法 ( “物理统计” 方法)                                 | ( 7 )  |
| 1.4.2 大型天气学方法                                           | ( 7 )  |
| 1.4.3 数学统计方法                                            | ( 7 )  |
| 1.4.4 气候模式方法                                            | ( 8 )  |
| 1.4.5 地气图方法                                             | ( 9 )  |
| 参考文献                                                    | ( 11 ) |
| 第 2 章 地球系统运转的动力源——宇地磁耦合假说                               | ( 13 ) |
| 2.1 地球系统动力源的研究历史回顾                                      | ( 13 ) |
| 2.1.1 热                                                 | ( 13 ) |
| 2.1.2 力                                                 | ( 13 ) |
| 2.1.3 磁                                                 | ( 14 ) |
| 2.2 地球系统的“变压器效应”                                        | ( 15 ) |
| 2.2.1 核幔边界 (CMB) 特性                                     | ( 15 ) |
| 2.2.2 辐射带特性                                             | ( 17 ) |
| 2.2.3 变压器耦合效应                                           | ( 17 ) |
| 2.3 地球系统的总能量守恒假定与外核环流的总枢纽作用                             | ( 18 ) |
| 2.4 宇地磁耦合假说的证据之一——地球系统巨旋回 ( $10^8$ 年 ) 的原因              | ( 20 ) |
| 2.4.1 地质构造巨旋回的事实分析                                      | ( 20 ) |
| 2.4.2 银地磁耦合的 3 亿年周期分型                                   | ( 21 ) |
| 2.4.3 全球地内强经向环流型在地表层的表现                                 | ( 22 ) |
| 2.4.4 全球地内强纬向环流型在地表层的表现                                 | ( 23 ) |
| 2.4.5 弱耦合型与联合古陆                                         | ( 24 ) |
| 2.5 宇地磁耦合假说的证据之二——青藏高原的升降与季风气候突变 ( $10^7 \sim 10^5$ 年 ) | ( 25 ) |
| 2.5.1 高原隆升数学模型的建立                                       | ( 25 ) |

|                                             |      |
|---------------------------------------------|------|
| 2.5.2 资料及求解 .....                           | (26) |
| 2.5.3 计算结果的验证 .....                         | (27) |
| 2.5.4 “模式曲线”所揭示的季风气候突变 .....                | (28) |
| 2.5.5 海平面升降与地磁极性反转 .....                    | (31) |
| 2.6 宇地磁耦合假说的证据之三——米氏周期的成因 ( $10^4$ 年) ..... | (32) |
| 2.7 大尺度地气运动的平均特征 .....                      | (34) |
| 2.7.1 资料与计算方法 .....                         | (35) |
| 2.7.2 土壤导温率 $K$ 的计算 .....                   | (35) |
| 2.7.3 土壤热流值 $Q$ 的计算 .....                   | (36) |
| 2.7.4 岩石圈中全球尺度热量水平输送量级的初步估算 .....           | (38) |
| 参考文献 .....                                  | (39) |

### 第3章 $10^3 \sim 10^0$ 年气候变化的基本事实和原因 .....

|                                                   |      |
|---------------------------------------------------|------|
| 3.1 1.5 万年来 $\Delta^{14}\text{C}$ 浓度的“双千年波” ..... | (42) |
| 3.2 2600 年来黑子周长的变化 .....                          | (43) |
| 3.3 用太阳活动拟合 2000 年来的温度变化 .....                    | (44) |
| 3.3.1 资料处理和数学模型 .....                             | (44) |
| 3.3.2 事实分析 .....                                  | (45) |
| 3.4 黑子周长的年代际变化与中国气候 .....                         | (48) |
| 3.4.1 “好、坏天时”的划分标准及划分结果 .....                     | (48) |
| 3.4.2 好坏天时代与中国旱灾的统计相关 .....                       | (49) |
| 3.4.3 “好(坏)天时纪”的划分及气候“暖(冷)期”的对比 .....             | (50) |
| 3.5 “好(坏)天时”与历史上的“顺(乱)世” .....                    | (52) |
| 3.5.1 “顺世”与“好天时纪”的统计相关 .....                      | (53) |
| 3.5.2 “乱世”与“坏天时纪”的统计相关 .....                      | (53) |
| 3.5.3 “好天时纪”中“坏天时代”的影响 .....                      | (54) |
| 3.5.4 “坏天时纪”中“好天时代”的影响 .....                      | (56) |
| 3.5.5 周朝好坏天时纪的初步划分 .....                          | (57) |
| 3.6 近 500 年地球各子系统年代际演变的相关分析 .....                 | (58) |
| 3.6.1 近 600 年的 $SCL$ 距平累积值与北半球气温和地磁能量的统计相关 .....  | (58) |
| 3.6.2 日强(弱)段与我国汛期主雨带位置的关系 .....                   | (59) |
| 3.6.3 日强(弱)段全球 $\geq 7$ 级地震的统计分析 .....            | (60) |
| 3.6.4 黄河龙头水库水量丰枯的年代际变化 .....                      | (61) |
| 3.6.5 高低纬反向变化的可能原因 .....                          | (63) |
| 3.7 近百年黑子周长 ( $SCL$ ) 对我国天灾的操控作用 .....            | (64) |
| 3.8 $10^0$ 年气候变化的可能原因 .....                       | (66) |
| 3.8.1 西北太平洋强震活动概况 .....                           | (66) |
| 3.8.2 “活跃期”与“平静期”的划分标准及划分结果 .....                 | (66) |
| 3.8.3 “强震活跃期”与 El Nino .....                      | (67) |

|                                    |                |
|------------------------------------|----------------|
| 3.8.4 “强震活跃期”与地球自转 .....           | ( 69 )         |
| 3.8.5 关于三者基本同步的可能原因 .....          | ( 70 )         |
| 3.8.6 小结 .....                     | ( 71 )         |
| 参考文献 .....                         | ( 71 )         |
| <b>第 4 章 制约短期气候变化的地面气候系统 .....</b> | <b>( 74 )</b>  |
| 4.1 何谓地气和地气图 .....                 | ( 74 )         |
| 4.2 地形变场与地温距平场的准等价性 .....          | ( 75 )         |
| 4.2.1 地形变场的分析原理和方法 .....           | ( 75 )         |
| 4.2.2 地形变场的统计特征 .....              | ( 77 )         |
| 4.2.3 地凸区的移动特征 .....               | ( 79 )         |
| 4.2.4 地形变场与地温场的相关分析 .....          | ( 79 )         |
| 4.3 地面气候系统主要成果之一——地热涡 .....        | ( 81 )         |
| 4.3.1 “地热涡”的定义 .....               | ( 81 )         |
| 4.3.2 “地热涡”的时空特征 .....             | ( 82 )         |
| 4.3.3 “地热涡”中心的地理分布 .....           | ( 83 )         |
| 4.3.4 “地热涡”的水平移动 .....             | ( 85 )         |
| 4.3.5 “地热涡”时空尺度与地震强度 .....         | ( 86 )         |
| 4.3.6 地震出现地点与“地热涡”的关系 .....        | ( 87 )         |
| 4.4 地面气候系统重要成员之二——地冷涡 .....        | ( 90 )         |
| 4.4.1 大地冷涡的标准及统计结果 .....           | ( 90 )         |
| 4.4.2 冬季大地冷涡与春夏季干旱的统计相关 .....      | ( 91 )         |
| 4.4.3 大地冷涡与其东面干旱区的统计相关 .....       | ( 92 )         |
| 4.5 关于地(地壳、上地幔)气耦合的概念模式 .....      | ( 93 )         |
| 4.6 短期气候预测地气图方法的 7 条预报规则 .....     | ( 94 )         |
| 4.6.1 地气图方法的基本原理 .....             | ( 94 )         |
| 4.6.2 能量频散规则 .....                 | ( 94 )         |
| 4.6.3 相干共振规则 .....                 | ( 95 )         |
| 4.6.4 下游阻塞规则 .....                 | ( 96 )         |
| 4.6.5 侧向抑制规则 .....                 | ( 96 )         |
| 4.6.6 驻波不频散规则 .....                | ( 96 )         |
| 4.6.7 风吹雨斜规则 .....                 | ( 97 )         |
| 4.6.8 准半年重现规则(准半年韵律) .....         | ( 97 )         |
| 参考文献 .....                         | ( 99 )         |
| <b>第 5 章 地震、地热涡与降水 .....</b>       | <b>( 101 )</b> |
| 5.1 我国的 4 条地热涡列与地震和降水 .....        | ( 101 )        |
| 5.2 冬季亚洲强震与夏季我国东部主雨带的准同纬性 .....    | ( 105 )        |
| 5.2.1 冬季亚洲的中强震 .....               | ( 105 )        |

|                                          |       |
|------------------------------------------|-------|
| 5.2.2 与中强震相伴的地热涡和东部地热涡的中心纬度 .....        | (106) |
| 5.2.3 表 5.1 上 4 组纬度数列之间的统计分析 .....       | (109) |
| 5.2.4 特例分析 .....                         | (110) |
| 5.3 全国性早、震、涝关系的统计分析 .....                | (111) |
| 5.3.1 全国多雨区面积比的年变化特征 .....               | (111) |
| 5.3.2 特干月——开端强震的前兆信号 .....               | (112) |
| 5.3.3 强震活跃期与多雨区面积比的统计相关 .....            | (113) |
| 5.3.4 全国性连续多雨时段与强地震的相关统计 .....           | (114) |
| 5.3.5 “早震涝”关系的原因探讨 .....                 | (115) |
| 5.4 西北太平洋强震与中国大陆降水 .....                 | (116) |
| 5.4.1 西北太平洋强震与我国东部旱带 .....               | (116) |
| 5.4.2 冬春台湾板缘强震与大陆夏季旱涝分布 .....            | (119) |
| 5.4.3 台湾弱震年与江淮洪涝 .....                   | (121) |
| 5.5 中阿巴热点强震与我国北方干旱 .....                 | (123) |
| 5.6 中印缅热点强震与我国南方多雨 .....                 | (125) |
| 5.6.1 热点强度的直接指标和间接指标 .....               | (125) |
| 5.6.2 热点强度的 $10^1$ 年变化及与天文、地球因素的相关 ..... | (125) |
| 5.6.3 热点强度的年内变化及其气候响应 .....              | (126) |
| 5.6.4 热点及周边 $\geq 6.5$ 级强震与我国南方多雨季 ..... | (127) |
| 5.6.5 热点区强震与全国性多雨的个例分析 .....             | (129) |
| 参考文献 .....                               | (131) |

# 第1章 绪 论

本书所谓的“地气”是储存在地壳、地幔和地核中各种地下流体的总称。在地壳中，它运行于固体架构的空隙之间，与大气圈无时无刻不在进行气体交换（地球呼吸）。“地气图”是指能表征地下流体活动的图表。对 $<1a$ 的短期气候变化，“地气图”是观测最深一层（目前是 $3.2m$ ）的地温距平图、地震图及其各式变程；对中长期气候变化，它是反映太阳活动和GPS观测到的地壳运动的各种图表；对地质气候变化，它应该是那些描述地磁极性反转和银河旋臂磁场与地磁场相互耦合的图表。本书各章主要都是讨论这些图表（统称为“地气图”）在各种气候变化中的指示作用。

## 1.1 气候系统与地球系统

1974年在“气候的物理基础及其模拟”的国际讨论会上，首次提出了“气候系统”（Climate System）的概念。接着在1979年的“世界气候大会”上，明确要求将气候系统的5个圈层（岩石、水、冰雪、大气、生物）结合起来研究。这是全世界气候学者在认识上的一次大飞跃，将气候学从属于气象学与地理学之下的一个分支学科，提升为地球物理学、地质学、海洋学、气象学和生态学之间的一个交叉学科。在此革命性思想的指导之下，30多年来，气候学得到了突飞猛进的进展。

“气候系统”的概念是如此地吸引人，以至于地球科学家在1980年代初提出了“地球系统”（Earth System）的概念。两者的差别仅在于将前者中的“岩石圈”换成为“固体地球圈”（包括岩石圈、上下地幔和内外地核）。气候变化的研究也随之扩充为“全球变化”（Global Change）的研究。

### 1.1.1 全球气候系统的基本特征

全球岩石圈的平均厚度约为 $75km$ 。若将固态水（冰雪）并入水圈之中，则气候系统4个子系统的总质量或总热容之比为，岩：水：气：生 $\approx 10^4 : 10^3 : 10^0 : 10^{-2}$ ，可见岩石圈占气候系统总质量的90%，而生物圈则微不足道（但从经济价值而言，它可能是最大者，且人类本身亦包括在生物圈中）。在此4个圈层中只有固体圈与大气圈是连续不断地分布于整个地球，因此该两圈层的相互作用具有时空连续性，最值得引起重视。

若将“气候系统”扩展为“地球系统”，即将岩石圈扩展为“固体地球圈”则4个圈层所占质量之比约为，固：水：气：生 $\approx 10^6 : 10^3 : 10^0 : 10^{-2}$ ，即是说固体圈占有99.9%的质量，它在地球系统（包括气候系统）的演化中必然处于中心地位。

地球内部充斥着气体。有人认为在地球系统中存在着5个气圈<sup>[1]</sup>，大气圈只是其中之一，而且其质量很小，如上地幔气圈的质量比大气圈要大83倍<sup>[1]</sup>！地球5个气圈之间不断地进行着气体交换，特别是地内气体与大气圈之间的交换，有人称之为“地球呼吸”<sup>[2]</sup>，是气候变化的主要操控者。

地气热交换的时空分配非常不均匀,使得气候的时空变化非常复杂。如现代全球平均大地热流值约为  $50\text{mW/m}^2$ ,而中印缅热点区的热流值可达  $25\text{W/m}^2$ <sup>[3]</sup>,比全球平均要大 500 倍!根据 Etiope 的统计<sup>[4]</sup>,全球非火山区最强的地气交换出现在美国加利福尼亚,其值达到  $216000\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。关于时变的例子,可以举出河北怀来后郝窑断层的地下  $\text{CO}_2$  观测,已有 10 多年的连续记录,在地震之前数月  $\text{CO}_2$  的通量可比其背景值大 2 个数量级!其地热通量可达  $10^0\text{W/m}^2$  的量级<sup>[5]</sup>,足以引起短期气候变化。看来找到一套可准确描述地热通量时空变化的图表,是进行短期气候预测的基础。“地气图”,可能就是这样的一套图表。

到目前为止,关于“气候系统”的定义一般如下:气候系统是地球表层 5 个子系统(大气圈与岩石圈、水圈、冰雪圈、生物圈)相互作用(或耦合)而组成的系统。随着新世纪的来临,人们已经不满足于这种空泛的定义,正如上世纪初人们不满足于:“天气系统是冷、暖气团相互作用的系统”一样,而去努力寻求能表征此种相互作用的具体系统。随着“挪威学派”的成功,人们早已公认“地面天气系统”是指气旋(低压)、反气旋(高压)和锋面等这样一些具体系统。所谓“天气预报”即是对天气系统未来活动的预测。那么,我们现在是否可以找到能体现大气圈与岩石圈、水圈……相互作用的、具体的“地面气候系统”?本书提出对短期气候变化而言:地热涡、地冷涡与形变锋等很可能就是这种“地面气候系统”。若真是这样,则短期气候预测就可以转化为对“地面气候系统”未来活动的预测。

### 1.1.2 运转地球系统的能源<sup>[6]</sup>

现在一般公认地球系统(气候系统在其中)由两台发动机组成:①太阳辐射发动机,地球得到太阳辐射能的总功率量级为  $10^{17}\text{W}$ ;②地球内部发动机,它维持着地核和地幔环流的运转。在地球内部放出的能量与发动机得到能量相平衡的假定下,可算得内部发动机的总功率量级为  $10^{13}\text{W}$ ,比太阳发动机小 4 个量级。

关于地内发动机的能量来源,存在颇大的争议。有人认为其能源是放射性元素衰变和重力分异。如果说在地球开始形成的早期,该两种过程可作为地内发动机的主要能源的话,经过 46 亿年后的今天,仍将它们看成是地内发动机的主要能源,则无异于将地球内部看成为“孤立系统”,这是值得商榷的。有人提出了地内能源的“变压器效应”说<sup>[7]</sup>:整个地球可看成是一个“变压器”,电离层及其以上的带电大气环流是“变压器”的“初级线圈”,地球外核的磁流体环流是“变压器”的“次级线圈”。太阳风、磁暴等太阳活动能量(它约占太阳总辐射能的 1%,即约为  $10^{15}\text{W}$ )到达高层大气后,即因“变压器效应”而感应地核环流发生变化。只要此“变压器”的效率达到 1%,即可使地内发动机得到  $10^{13}\text{W}$  的能源,而刚好维持其运转。可见地球“变压器”是一个低效变压器。

“变压器假说”的优点是太阳活动的变化可直接影响到地球内部,而无需时间落后。对周期  $<10\text{a}$  的短电磁波,由于地壳和地幔的强屏蔽作用,不能进入地核中。但对周期  $>10\text{a}$  的宇宙电磁波,则可无阻挡地进入地核环流中。

关于地球内部与大气圈的物质交换已经有一些研究结果。如地球内部  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  等可通过火山、温泉等释放到大气中<sup>[8,9]</sup>。但地气间能量的交换由于以前认为很小而被忽视。地学界已普遍认为,地球内部的放热不只是分子热传导一种方式。目前已知,大气中至少存在 3 种热传输过程,其热扩散率分别为<sup>[10]</sup>:①分子热扩散率,其数值约为  $2 \times 10^{-5}$  (单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ ,下同),它比土壤的分子热扩散率约大 2 个量级,②湍流热扩散率,比

分子热扩散率约大 5 个量级；③大型涡旋热扩散率，其量级为  $10^6$ ，比分子热扩散率要大 10 个量级。对我国大陆 3.2m 深度地温的高温区内（称为地热涡）的地震统计结果发现<sup>[11]</sup>：在地热涡中心，地震极少发生，在地热涡的内侧，地震主断面的错动方向约有 90% 为左旋走滑；而在地热涡外侧，地震主断面的错动则以右旋走滑为主。这表明在地热涡的岩石圈中存在一种涡旋应力。与大气中的大型涡旋（如台风）进行类比，可知在地热涡中，地下热量是以大型涡旋的形式向上传，它比分子热扩散系数要大约 10 个量级。

对地质气候（ $>10^5$  年），地核环流可以带动地幔环流（地幔对流），进而影响到地表层的环境变化。对中长期气候（ $\leq 10^4$  年），无论地核环流有多强，都不可能带动地幔对流有明显变化。根据“变压器效应说”，太阳的电磁活动可直接激发核幔边界 D'' 层的扰动，它通过地幔热柱的“小孔”效应，迅速传递到上地幔软流圈，进而操纵着“地面气候系统”——地热涡、地冷涡等，使气候发生变化。这对太阳活动快速引起全球不同地区的气候变化是一种新的解释。

## 1.2 气候变化时序的自然分段

气候系统的时间谱很宽（ $10^{-2} \sim 10^9$  年），能否根据其变化规律将其分为若干段落？根据很多作者的研究，可以得到不同时间尺度（ $\tau$ ）的气温变化幅度（ $T_m$ ），如表 1.1 所示<sup>[12,13]</sup>。可见  $\tau=10^1$  年时， $T_m$  最小， $\tau=10^5$  年时  $T_m$  达极大。而且  $T_m$  是与  $\tau^{1/2}$  成反比（对  $\tau < 10^1$  年）或成正比（对  $10^1 \text{ 年} < \tau < 10^5 \text{ 年}$ ），可以写成如下形式：

表 1.1 气候变化的时间尺度与气温变幅的关系

| 时间<br>尺度   | 日*  | 天气<br>周期 | 月   | 季   | 年*    | 年    | 10 年        | 10 <sup>2</sup> 年 | 10 <sup>3</sup> 年 | 10 <sup>4</sup> 年 | 10 <sup>5</sup><br>年* | 10 <sup>6</sup> 年 | 10 <sup>7</sup> 年 | 3×10 <sup>8</sup><br>年* |
|------------|-----|----------|-----|-----|-------|------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
| 变幅<br>(°C) | ≈10 | 5~10     | 3~5 | 2~3 | 10~15 | ≈0.5 | 0.1~<br>0.3 | ≈0.5              | 1~2               | 3~5               | ≈10                   | 1~3               | 3~5               | 15~20                   |

注：有 \* 号者为外源强迫振荡，无 \* 号者为内部自由振荡

$$T_m \times \tau^{1/2} = \text{const}(C_1) \quad \text{当 } \tau \leq 10 \text{ 年} \quad (1.1)$$

$$T_m \times \tau^{-1/2} = \text{const}(C_2) \quad \text{当 } 10 \text{ 年} < \tau < 10^5 \text{ 年} \quad (1.2)$$

上式可称为“温度变幅与时间尺度的平方根定则”<sup>[12]</sup>，或简称为“温度变化的平方根定则”。其中  $C_1 \approx 0.5^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{1/2}$ ，（a 表示年）， $C_2 \approx 0.05^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1/2}$ （对  $10 \text{ 年} \leq \tau < 10^5 \text{ 年}$ ）；或  $C_2 \approx 0.001^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1/2}$ （对  $10^6 \text{ 年} < \tau \leq 3 \times 10^8 \text{ 年}$ ）。

若将  $\tau < 10$  年的气候自由振荡看成是随机过程，（外源强迫振荡不在此列），Leith 曾证明<sup>[14]</sup>，任取一有限时段做样本，其标准差（ $\delta_\tau$ ）服从于  $\delta_\tau \cdot \tau^{1/2} = \delta_0 \cdot \tau_0^{1/2} = \text{const}$ 。（ $\delta_0$  是  $\tau_0$  时段的标准差， $\tau_0 \approx 5 \sim 6$  天）。上式与（1.1）式是一致的。可见这种“平方根反比关系”实质上是一种随机耗散过程。可是对  $10 \text{ 年} < \tau < 10^5 \text{ 年}$  的气候振荡为什么不继续随机耗散，而是服从“平方根正比关系”呢？这是关于气候变化原因的核心问题之一。我们认为其根本原因是大地热流的平均值不是零，而是  $50 \text{ mW/m}^2$ 。下面予以说明：

假定对气候系统的加热，首先是加在地表面，然后再向大气和下垫面内部传递，引起温度变化。对零维气候系统（将地球缩成一个点）可以得到，某一时段（ $\tau$ ）内，气候系统的

温度变幅（ $T_m$ ）与相应的能通量变幅（ $E_m$ ）有如下简单关系<sup>[15]</sup>：

$$E_m = \lambda T_m \cdot \tau^{-1/2} \tag{1.3}$$

$\lambda$  是一常数， $\lambda \approx 10 \text{W/m}^2 \cdot \text{a}^{1/2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

由表 1.1 和 (1.1) ~ (1.3) 式可以绘出  $T_m(\tau)$  和  $E_m(\tau)$  的关系曲线，如图 1.1 所示，可见  $T_m(\tau)$  是两条抛物线， $E_m(\tau)$  是几根折线。对  $\tau < 10\text{a}$  的 AB 折线，其方程是  $E_m \cdot \tau = \lambda C_1$ ，这表示随着时间尺度（ $\tau$ ）的增长， $E_m$  呈反比的变小，这是一种能量逐级耗散过程。对  $10^1\text{年} < \tau < 10^5\text{年}$  的折线 BC 段，其方程式为： $E_m = \lambda C_2 \approx 50\text{mW/m}^2$ ，此值与地球内部放散的大地热流背景值一致。折线 CD 段与 AB 段性质相同，也是一种能量耗散过程。DE 段的方程是  $E_m = 10^{-3} \text{W/m}^2$ ，这相当于温度是  $5 \sim 10\text{K}$ （ $-268 \sim -263^\circ\text{C}$ ）的黑体辐射，与宇宙空间的“背景辐射”基本相等。

不同时间尺度（ $\tau$ ）气温与降水变化的相关系数（ $\gamma_{RT}$ ）也经过了很多作者的统计分析，其基本结论有如图 1.2 所示<sup>[16]</sup>。可见对  $\tau > 10^5\text{年}$  的地质气候  $\gamma_{RT} < 0$ ，即气温与降水是反向变化，对  $\tau = 10^1 \sim 10^4\text{年}$  中长期气候变化  $\gamma_{RT} > 0$ ，即气温与降水是同向变化，对  $\tau < 10^1\text{年}$  的短期气候又是  $\gamma_{RT} < 0$ 。于是根据图 1.1 和图 1.2 可以将气候时序分为三个自然段落，如表 1.2 所列。

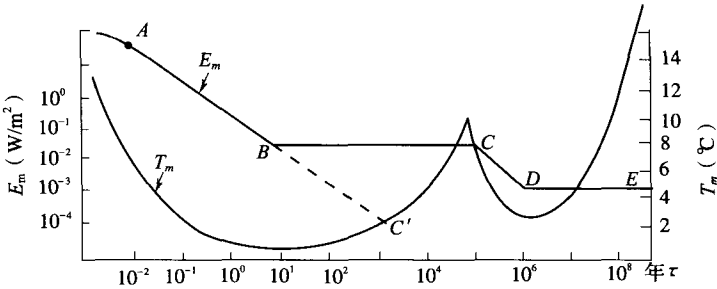


图 1.1  $E_m T_m$  与  $\tau$  的关系曲线

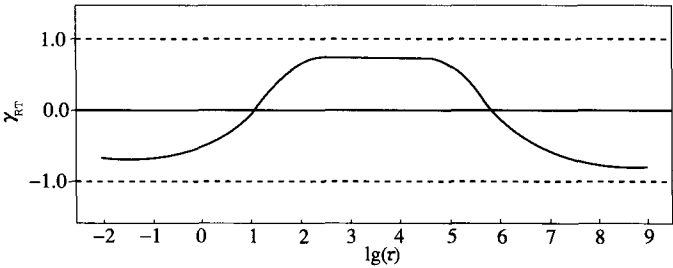


图 1.2 温度与降水相关系数的时序（ $\tau$ ）变化示意图

表 1.2 气候时序自然分段的名称初拟

| 段落名称                       | 短期气候      |           |       | 中长期气候            |                  |        | 地质气候             |                  |                  |
|----------------------------|-----------|-----------|-------|------------------|------------------|--------|------------------|------------------|------------------|
| $\tau$ (a)                 | $10^{-2}$ | $10^{-1}$ | 1     | $10^0 \sim 10^1$ | $10^2 \sim 10^3$ | $10^4$ | $10^5 \sim 10^6$ | $10^6 \sim 10^7$ | $10^8 \sim 10^9$ |
| 名称                         | 旬月        | 季         | 年度    | 中期气候             | 长期气候             | 米氏气候   | 小旋回              | 中旋回              | 巨旋回              |
| $\gamma_{RT}$ 符号           | —         | —         | —     | +                | +                | +      | —                | —                | —                |
| $T_m$ ( $^\circ\text{C}$ ) | 3~5       | 2~3       | 0.5~1 | 0.1~0.3          | 0.5~2            | 2~3    | 5~10             | 1~5              | 15~20            |

为什么气候时序可以分为如此3个自然段落？本书以后各章将对此予以讨论。其基本原因是：地核环流的加强对地表层有两方面的作用：一是使地热释放增强，地表升温，降水增多；一是使大地形隆升，大气热机效率提高，降水增多，同时纬圈大气环流增强，高纬降温，形成大冰期。对地质气候（ $\tau > 10^5$ 年），后一作用占优势，故  $\gamma_{RT} < 0$ ；对中长期气候（ $10^1 \text{年} < \tau < 10^5 \text{年}$ ），地形抬升作用已不显著，以前一种作用为主，故  $\gamma_{RT} > 0$ ；但对  $\tau < 10^0$  年的短期气候，云对辐射的反馈作用盖过了地热释放的强度，使  $\gamma_{RT} < 0$ 。

### 1.3 关于气候系统行为的三个猜想<sup>[12]</sup>

由图 1.1 可见，当  $\tau > 10^1$  年时，为什么  $E_m(\tau)$  不继续沿 AB 线的方向随机耗散到  $C'$ （图 1.1 中断线），而是沿  $E_m = \lambda C_2 \approx 50 \text{mW/m}^2$ ，折向 BC 段？或者换句话说，为什么  $10^1 \sim 10^5$  年段的温度变幅会随时间而增大？这是理论气候学的一个基本问题。作者的猜想是：

猜想 1：对  $10^1 \sim 10^5$  年的气候变化，除太阳辐射外，还有另一种能源支持着，此能源的特点是其变幅与其平均强度同一量级，为  $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{W/m}^2$ ，它很可能就是发自地球内部的大地热流。

猜想 2：气候系统的稳定性是由外参数（太阳常数、地球质量、半径等）的基本稳定所决定的，振荡性是其稳定性的固有表现；或曰具有稳定性的气候系统必然具有振荡性。只有远离平衡态的气候，才可能没有振荡性。

关于稳定性与振荡性的关系。至少从元古代（约 23 亿年）以来，气候系统就是现在的格局，它不停地振荡，但其振幅总被限制在一定的幅度之内，如全球平均温度从未降到使全球出现冰盖的临界温度（ $-10^\circ\text{C}$ ），也从未升到使全球汽化的临界温度（ $42^\circ\text{C}$ ）。实际出现的温度恰好是在此两个极端温度的中值（ $16^\circ\text{C}$ ）附近摆动，其振幅从未超过  $10^\circ\text{C}$ ，使得自元古代以来地球上的液态水一直存在，适合于生物生存、进化。从这个意义上说气候系统从来是稳定的。但在气候系统的历史长河中，它从未停止过振荡，这期间肯定出现过无数次的非线性相互作用和混沌态，可是气候系统仍然是稳定的（液态水始终存在）。这种稳定性与振荡性之间有什么内在联系？我们提出了以上猜想。

对只有气温（ $T$ ）和地温（ $T_s$ ）两变量的线性气候系统，我们曾证明了上述猜想的正确性<sup>[17]</sup>。从大气能量平衡方程和下垫面能量平衡方程出发，考虑到  $T$  和  $T_s$  的互反馈，可得到描述该气候系统的特征方程<sup>[12]</sup>：

$$\omega^2 + (2d_3 - d_2^2)\omega + d_3^2 = 0 \quad (1.4)$$

$$\text{或} \quad \omega_{1,2} = \frac{1}{2} (d_2^2 - 2d_3 \pm \sqrt{d_2^4 - 4d_3^2 d_3})$$

$\omega$  是特征频率， $d_2$ 、 $d_3$  为描述气候系统平均态的参数。可见该系统达到临界稳定态的条件是

$$d_2^2 - 2d_3 = 0 \quad (1.5)$$

存在振荡的条件是

$$d_2^2 - 4d_3 < 0 \quad (1.6)$$

由 (1.5)、(1.6) 式，在  $(d_2, d_3)$  的相平面上，可划出该系统的稳定性与振荡性特征。从图 1.3 可见当系统处在稳定域时（ $d_2^2 < 2d_3$ ）必然伴有振荡，甚至当系统处在弱不稳

定区时 ( $2d_3 < d_2^2 < 4d_3$ ) 亦有振荡存在, 只有在远离平衡态后 ( $d_2^2 < 4d_3$ ) 振荡性才会消失。这就证明了“猜想 2”至少在简单的气候系统中是成立的。在一般情况下它是否成立尚未得到证明, 故称之为“猜想”。

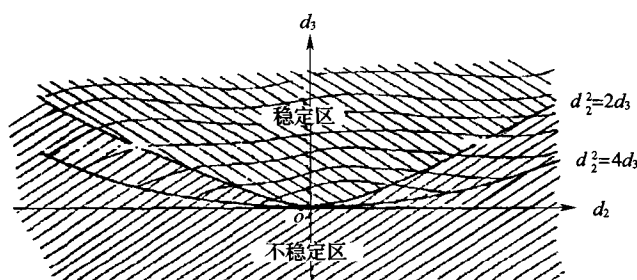


图 1.3 稳定性与振荡性的关系示意图  $\approx$  为振荡域、\\ 为稳定域、/// 为不稳定域

猜想 3: 气候系统的临界稳定态往往是振荡最快的态, 亦即能量转换效率最高的态。实际出现的气候态总是围绕在临界稳定态左右摆动, 因此现实的气候态只是趋于达到“振荡最快”, 并非真正能达到“效率最高”。

气候系统的行为是否要受到某种极值条件的约束? 这始终是理论气候学中很具魅力的课题。“极值原理”在物理学中普遍承认, 在气象学中不少人也在寻找它的具体表现形式, 如 Lorenz<sup>[18]</sup>的“最大效率原理”, Paltridge<sup>[19]</sup>的“熵产生极大”等。但是这些提法尚未得到严格的证明, 特别是 Paltridge 的“熵产生极大”与 Prigogine 所证明的热力学的线性系统“熵产生极小”是直接矛盾的。因此, 目前气象学中关于“极值原理”的各种具体提法都只能认为是假设。现实的气候系统是否一定服从某种极值条件呢? 作者提出了“猜想 3”。

仍考虑上述两变量的气候系统, 当 (1.6) 式满足时, 系统的振荡频率是

$$\omega_i = \frac{1}{2} d_2 \sqrt{4d_3 - d_2^2} \quad (1.7)$$

若  $d_2$ 、 $d_3$  是两个独立变数, 当  $d_3$  一定时, 取  $\frac{\partial \omega_i}{\partial d_2} = 0$ , 由 (1.7) 式可得到  $\omega_i$  取极大值的条件是  $d_2^2 - 2d_3 = 0$ , 这就是 (1.5) 式。当系统达到临界稳定态时 ( $d_2^2 - 2d_3 = 0$ )  $\omega_i$  取极大值 (振荡最快), 于是在线性系统中, “猜想 3”得证。

实际的气候系统远比上述两变量系统要复杂。我们<sup>[20]</sup>曾用实际可能出现的各种参数计算过“三变量气候系统”的多个“极小周期”与“临界稳定周期”, 发现两者之间确实差值很小。这也说明“猜想 3”可能是正确的。

## 1.4 短期气候预测的历史回顾

人类自从进入农业社会后, 农业收成的丰歉就一直是人们最为关心的事。经过多年的实践, 人们体会到气候条件是影响丰歉的重要因素。因而开始关注气候的预测。但由于当时历史条件的限制, 人们看不到全球气候之间的相互联系。只能根据本地的前期状况来预测本地后期的气候变化。这可称为是“古典气候预测学”阶段。明末徐光启在其“农政全书”中, 专列一卷名为“农事测候”, 它是“古典气候预测学”之集大成者。直

到20世纪初,挪威学派的出现,人们才猛然发现,世界天气是紧密相连的。接着 WaLker 提出了“三大涛动”,将全球气候变化相互联系了起来。气候预测才从“古典阶段”迈向了“现代阶段”。

目前在国内外已经实际应用于短期气候预测的方法,大体可分为五类:经验方法(或称为“物理统计”方法);大型天气学方法;数学统计方法;气候模式方法;地气图方法。下面逐一进行简单评介。

### 1.4.1 经验方法 (“物理统计”方法)

根据多年经验(包括“农谚”中的群众经验),定性地知道,在天地之间发生了某种自然现象后,某地的气候会发生相应的变化。如较强火山爆发后数年内全球平均温度会降低,厄尔尼诺发生后赤道东太平洋降水会增多;月赤纬极大年中纬度某些地区会发生大旱,某地域地温增高后,该地域以后降水会增多,以及“立秋地发热,来年春雨浇”等等。从气候变化的物理原因上看,这些前后事件之间确实存在一定的“前因后果”关系。再用简单的统计方法(如相关、线性回归等),发现它们之间确有一定的可信度,于是可将其用于短期气候预测。此方法的优点是,当这种物理意义明确的“过硬指标”出现后,其预报准确率相当高。但遗憾的是此种“过硬指标”实在太少,以至于在多数时候和多数地点无法作出预报。而且“过硬指标”也有报错的时候,因为气候系统变化是复杂的,不是一种简单的因果关系。

### 1.4.2 大型天气学方法

20世纪20~30年代,随着挪威学派对短期天气预报的成功,Baur(德国)、穆氏(苏联)和 Namias(美国)等相继创立了“长期天气预报”的“天气学方法”。经不少国家(包括中国)的检验,均因效果不好而被人们扬弃。

### 1.4.3 数学统计方法

随着天文和地球系统观测资料的日积月累,现在已成为一个浩如烟海的资料库,人们可以对这些资料进行各种数学统计分析。如时间序列分析(包括平稳时间序列分析、方差分析、谱分析、小波分析等),相关与回归分析(包括一元回归、多元回归与逐步回归等),相似聚类分析,(包括一元相似聚类、多元相似聚类、场相似聚类),空间场分析(如 EOF 分析、最大熵谱分析、奇异值分析(SVD)、典型相关分析(CCA)等)。上述各种统计方法在进行气候统计的诊断分析,了解其各子系统之间的关系方面是有力的工具,也有不少好成果。但将它们用于短期气候预测,应该说不成功的。

20世纪70年代,随着电子计算机的普及,在我国掀起了“统计预报”的热潮。其发生背景是:我国自1958年开始内部发布“长期天气预报”。因经验方法找到的“过硬指标”太少,不能满足按时(旬、月、季…)发布各地气温、降水预报的要求,试过一些大型天气和环流型等预报方法,效果均不好。随着电子计算机的普及,预报员们自然想到用此先进工具来寻找“过硬指标”。经大量相关普查(或其他统计方法),果然对每一个预报对象几乎都可找到一些信度很高(如 $>99\%$ )的预报指标。于是各预报单位都可以据此而建立起气候预测的业务系统,常规的预测项目交给计算机即可自动完成。可是

此种自动完成的预报, 准确率很不稳定, 多年平均的总结果, 只略微好于随机预报。那问题出在哪里?

其实在 20 世纪 70 年代的“统计预报热”中, 即有人对用相关普查找出来的“好指标”表示过怀疑, 认为“可能是虚假的”。张先恭当时曾幽默地说过: “当我们(用计算机)好不容易找到一条预报规律后, 这条规律往往就变了”。即是说历史拟合率很高, 而实际的准确率很低。当时一位权威曾说过: 统计预报容易培养懒汉(意思是如果仅用统计方法作预报, 那么预报员从此可以不作研究, 只要玩玩计算机, 预报结果就可以拿出来了)。但当年的流行看法是: 既然历史相关如此之好, 它们之间应该有内在的物理联系, 只不过我们现在尚未发现而已。于是统计预报照样可以做下去。

数学上可以证明: 有限长度的随机数列(实际资料的长度都是有限的)之间的相关系数并不都趋于零, 它也是一种随机分布。即是说, 如果我们在成千上万条有限长度随机数列之间求两两相关, 总会找到几对(或几十对)相关系数很高的系列, 而它们之间毫无内在的物理联系(因为都是随机数列)。这是以相关普查方式找出的“好指标”往往都是虚假指标的原因。所以现在短期气候预测强调的是有物理意义的预报因子, 而不在乎数学统计方法有多高深。看来气候预测的根本出路是要建立气候预测模式。数学统计方法只能作为权宜之计, 不应是根本出路。

#### 1.4.4 气候模式方法

20 世纪 50 年代, 随着 Charney 的短期数值天气预报的成功, 特别是 Phillips 1956 年对全球大气环流平均态的模拟成功, 在国内外又掀起了用 GCM 及各种耦合模式模拟平均气候和预测短期气候变化的热潮, 这些被称为“大气动力学方法”或“数值模拟方法”。它们对大尺度气候平均态的模拟, 达到了“登峰造极”的地步, 这表明太阳辐射和下垫面(海陆、地形、冰雪、植被等)确实是气候平均态形成的决定性因素。各种模式在“敏感性”实验方面也有一定的可信度。可就是在短期气候(如 1 个月以上)预测方面, 数十年来进步甚微。

在 20 世纪 80 年代初, 国内曾研究出 3 个短期气候预报模式: 距平滤波模式, 动力—统计模式和地温—热力学模式。遗憾的是经过多次实践检验这些模式的预测效果很不稳定, 其平均的准确率很低, 因而逐渐被人们遗忘了。

到现在国内用于做短期气候预测的模式, 包括国人自己研制的(如 IAP 两层模式)和国外引进的, 已经不计其数, 大体可分为三类: 简单气候模式, 如能量平衡模式(EBM), 辐射对流模式(RCM), 混合层海洋模式等; 中等混合气候模式, 如全球大气耦合混合层海洋模式, 统计大气动力海洋模式等; 复杂气候模式, 如全球大气环流模式(AGCM), 全球海洋环流模式(OGCM), 及它们与海冰、积雪、陆地生物圈等耦合嵌套后组成的全球气候系统模式(CGCM、GCSM)。

在预报技巧上也有很多改进, 如用集合(Ensemble)方法, 消除气候漂移等等。在每年的全国汛期预报会商会上, 都有不少模式预报结果公布出来。经实践检验的结果, 它们的预报效果也是很不稳定, 距达到实用水平尚有差距。

为什么经过国内外学者 30 多年的研究, 模式本身也由简单变成了很复杂。(如海、气、陆、冰耦合模式), 可是短期气候预测的准确率仍然没有根本性提高, 达不到实际应用的水

平?看来企图用 GCM 模式解决短期气候预测问题的想法是不切合实际的。人们开始寻求其它的气候模式。问题的症结何在?也许从大气的能耗等级可看出一些问题。

大气活动的能耗水平可分为 3 个层次:平均气候态的形成是由太阳辐射收支所决定,其能耗水平为  $10^2 \text{ W/m}^2$  (约  $300 \text{ W/m}^2$ );短期天气变化以动能转换为特征,其能耗水平为  $10^0 \text{ W/m}^2$  (约  $2.3 \text{ W/m}^2$ );短期气候变化(月~年)以内能增减为特征,其能耗水平为  $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{ W/m}^2$ 。即是说,平均气候、短期天气和短期气候是分属于 3 个不同能耗层次的大气活动,故它们应该用本质上不同的方程组来进行描述。如用大气动力学方程组来描述短期气候变化,即使将大地热流项(平均为  $0.05 \text{ W/m}^2$ )加入到方程组中,也会因动能转换的计算误差而将其湮没,使其显露不出对气候变化的效应。

### 1.4.5 地气图方法

原中国科学院兰州地球物理研究所(现中国科学院寒区旱区环境与工程研究所)于 1961 年成立了“干旱气候组”。1963 年在“春雨的中期预报”研究中,我们用天气学方法预报降水发生日期(根据高空槽移速外推)尚能自圆其说。但降水将落在何处?我们面对着 5 天以前的各种天气图,竟然找不到一个可以自圆其说的说法(更不用说预报准确率的高低)。在万般无奈之际,作者想起了群众经验,如陇东农民用冬季黄鼠狼洞的深浅来预测来年雨水多少(洞浅主雨,洞深主旱)和“立秋地发热,来年春雨浇”等农谚,以及新疆天山某气象站观测员的预报经验:“地温连升三天,必有一场降水”。这些群众经验给作者深刻启迪:前期地温与后期降水可能有某种关系。我们当即分析了 1956 年 3—5 月全国逐日 0cm(或 5cm)地温距平分布图(共 92 张)和西北东部共 9 次降水过程的降水量分布图。异常惊喜地发现:降水量的最大轴线与数天前地温正距平最大轴线的走向和位置均基本相合,或偏向东南方约  $150 \sim 300 \text{ km}$ 。这就为降水落区的中期预报找到了一个可以自圆其说的说法。1974 年冬又将我国 1954—1973 年冬季的 1.6m 地温距平图绘出来了。再一次惊喜地发现,冬季地温场形势与半年后汛期(4—9 月)降水场的形势有非常好的相关:冬季的高(低)地温轴线与汛期的多(少)雨轴线基本对应(以下简称“高多低少规则”)。

当“高多低少规则”于 1974 年冬季被发现后,是否应该用它来做实际预测?当时是有争议的。反对者认为:我们是科研单位,是研究预测方法的。方法的应用是各级气象台的事,不用我们去做。其实质是担心若连着二三年预报不好,则地温方法的研究工作都将无法搞下去。赞成者(这里包括曹恩爵先生)的理由是:①现今的各种长期预报(短期气候预测)方法准确率都不高,处在“猜”的阶段,“高多低少规则”的历史拟合率有如此之高,相信用它做实际预报,其准确率不会比别的方法差;②当今短期气候预测方法研究的主流是各种 GCM 模式,它得到了世界各国权威们的普遍支持,“地温方法”的实际预测结果只有比它好,才有可能继续研究下去,否则,即使文章写得再多,也很难发表,只能束之高阁;③为了“地温方法”本身的继续发展,也必须做实际预测,只有研究者实际做预测,才能切实知道方法的问题所在,可使方法的改进提高得更快(这是曹恩爵先生一再强调的)。我们最终选择了坚持做实际预报的道路。在 1975 年 4 月长江流域规划办公室召开的空前盛大的长期天气预报讨论会上,我们第一次用当年冬季的 1.6m 地温距平图,预测了当年的汛期降水分布。还在大会上报告了