

气候原理与气候预测

解放军理工大学气象学院

二〇〇六年七月

P46
85

气候原理与气候预测

第一章 绪论

1.1-1 气候的概念

1.1-2 气候系统

1.1-3 现代气候学概况

1.1-4 气候预测

第二章 太阳辐射

2.1-1 太阳常数

2.1-2 辐射平衡

2.1-3 能量收支

2.1-4 水分收支

第三章 气候形成的大气环流因素

3.1-1 大气环流的平均场

3.1-2 气团和气候带

3.1-3 大气环流异常对气候的影响

第四章 下垫面与气候

4.1-1 海陆分布对气候的影响

4.1-2 地形对气候的影响

4.1-3 冰圈对气候的影响

4.1-4 季风与气候

第五章 海洋-大气系统及

5.1-1 海洋在气候变化中的重要性

5.1-2 海洋环流与热量输送

5.1-3 海气相互作用

5.1-4 厄尔尼诺和 El Niño

第六章 气候分类与中国气

6.1-1 气候带与气候分类

6.1-2 中国气候区划

6.1-3 中国气候特征

解放军理工大学气象学院

二〇〇六年七月

目录

第一章 导论

§ 1-1 气候的概念	2
§ 1-2 气候系统	4
§ 1-3 当代气候学研究	9
§ 1-4 气候的诊断	12

第二章 辐射平衡和能量、水分收支

§ 2-1 太阳辐射	17
§ 2-2 辐射平衡	40
§ 2-3 能量收支	54
§ 2-4 水分收支	60

第三章 气候形成的大气环流因素

§ 3-1 大气环流的平均场	74
§ 3-2 气团和气候学锋	80
§ 3-3 大气环流异常对气候的影响	88

第四章 下垫面与气候

§ 4-1 海陆分布对气候的影响	100
§ 4-2 地形对气候的影响	109
§ 4-3 低温圈对气候的影响	115
§ 4-4 季风与气候	129

第五章 海洋-大气系统及其对气候的影响

§ 5-1 海洋在气候变化中的重要性	134
§ 5-2 海洋环流与热量输送	135
§ 5-3 海气相互作用	139
§ 5-4 南方涛动和 El Niño	144

第六章 气候分类与中国气候

§ 6-1 气候带与气候分类	156
§ 6-2 中国气候区划	169
§ 6-3 中国气候资源	174

第七章 气候变化

§ 7-1 气候变化的史实	193
§ 7-2 气候变化的可能原因	202
§ 7-3 人类活动对气候的影响	209
§ 7-4 气候预测问题	217

录目

第八章 气候资料的统计整理

- § 8-1 气候资料质量的评定
- § 8-2 气候资料的审查方法
- § 8-3 气候资料的序列订正
- § 8-4 各气象要素资料的统计整理

第 8 章	221
§ 8-1 气候资料质量的评定	222
§ 8-2 气候资料的审查方法	224
§ 8-3 气候资料的序列订正	235
§ 8-4 各气象要素资料的统计整理	235

第九章 气候预测的统计学方法

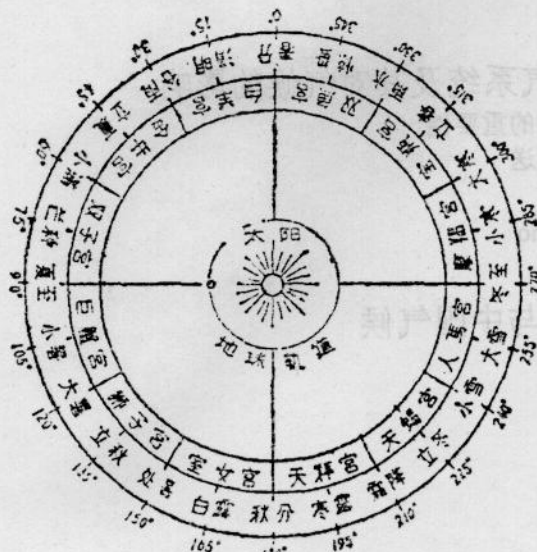
- § 9-1 概论
- § 9-2 韵律分析法
- § 9-3 秩相关秩相似法
- § 9-4 多层递阶预报方法

第 9 章	261
§ 9-1 概论	263
§ 9-2 韵律分析法	268
§ 9-3 秩相关秩相似法	271
§ 9-4 多层递阶预报方法	271

第十章 气候数值模式

- § 10-1 概论
- § 10-2 短期气候预测
- § 10-3 中期数值天气预报及其产品的释用

第 10 章	279
§ 10-1 概论	283
§ 10-2 短期气候预测	290
§ 10-3 中期数值天气预报及其产品的释用	290



Edited by ZM & WLq

第一章 导论

气候变化及其对经济和社会发展影响的问题已成为当前世界各国政府和科学家们所关注的重大问题。近十多年来世界范围内的气候异常给许多国家的粮食生产、水资源和能源带来了严重的影响。例如,1972年美国由于严寒带来的能源危机造成经济损失达200亿美元,1988年,美国中西部严重干旱造成粮食减产37%,而孟加拉国却遭受空前未有的水灾,非洲持续多年的干旱,使许多国家遭受本世纪最严重的粮食危机。因此,能否预报气候的这些异常变化已成为一个急需要解决的重大科学问题。另一方面,除气候的自然变化外,由于人类活动所引起的全球气候和生态环境变化的问题也日益引起人们的重视,特别是由于工农业生产、城市扩展和人口增长使大气中CO₂、CH₄等温室气体含量的增加,引起全球气温增高。初步估计,到20世纪中叶由此原因可造成全球年平均气温增加1.5—4.5℃,平均海平面增高20—140cm。这将使人类有可能面临最严重的气候剧烈变化。因此,怎样正确估计人类活动对未来气候及人类生存环境的影响,已成为当代另一个迫切需要解决的重大科学问题。

面临这些问题的严重挑战,70年代以来国际上召开了一系列会议,讨论与气候变化有关的问题。1974年由世界气象组织(WMO)和国际科学联盟理事会(ICSU)召开了“气候的物理基础及其模拟”的国际讨论会,系统总结了现代气候科学的研究结果,提出了需要进一步研究的科学问题。1979年,WMO又组织召开了“世界气候大会”。在这次会上,气候与人类的关系已成为重要议题。会议的结果之一是提出了制定“世界气候计划”(WCP)的建议。经过各国科学家几年的努力,先后于1984年和1985年公布了“世界气候研究计划”(WCRP)的科学计划和执行计划,WMO和ICSU正积极组织有效的国际合作,以期实施这个计划。WCRP是世界气候计划的一个组成部份,也是其中心环节,它的总目标是要确定:

- (1) 气候的可预报程度;
- (2) 人类活动对气候影响的程度。

总体目标是:

- (1) 建立月至季度的长期天气预报方法;
- (2) 预报年际尺度的全球气候变化;
- (3) 估计几十年期间内气候变化的趋势,特别是估计人类活动对气候的影响。

以上目标是在目前可能得到的综合观测资料和气候数值模式的实际能力的基础上确定的。应该注意到这三个具体目标是互相紧密联系的,第一个目标是实现第二个目标的基础,第一、二个目标又是实现第三个目标的基础。

我国地处世界上气候变率大的地区之中,气候灾害出现的频数很高,气候异常造成的损失甚为严重。中国历史悠久,在记录着几千年历史的浩瀚文献中,可以找到数不胜数的重大气候灾害事件。这一方面造就并锻炼了中华民族“人定胜天”的辩证思维方法和英雄气质,凝炼了“后羿射日”、“大禹治水”等许多可歌可泣的神话般的人间抗旱抗涝故事。另一方面,持续性的气候灾害在一定时期也造成了全国规模的大灾难,甚至影响到历史皇朝的更迭和民族关系的兴衰。中华人民共和国成立后,气象事业得到飞速发展,对气候的重视更是空前的。根据近40年的记录和研究结果,可以看到我国气候灾害的频发性和严重程度,以及它和世界气候异常的紧密相关。在最近40年中,每年都有数省或大江大河流域面积大小的地区遭受旱灾或水灾,而且往往是同一年份同一地区这季干旱另季洪涝。发生更大范围的持续性的大旱大涝的年份也为数不少。我国大洪涝年份有1954、1963、1975、1980、1983年等,大旱年份有1959、1960、1961、1972、1978年等。平均而言,每年因受旱涝灾害少收粮食约二千万吨,更不必说重灾年的损失是如何巨大了。因此,提高对气候灾害的预报和防治能力已是我国各级政府和国民经济各部门的迫切要求。同时,未来全球规模的气候变化趋势,以及由于我国国民经济的发展和各地区对各类资源的开发所带来的对气候和环境的影响,也是我们要十分注意的研究课题。

为了适应我国气候研究发展的需要并参加到世界气候研究计划中去,我国已于1986年成立了“中国气候研究委员会”拟订出我国最紧迫的研究课题的建议,并与WCRP及许多国家的气候研究组织建立了广泛的联系与合作。1987年我国又成立了“国家气候委员会”,全国的气候研究计划正在制订中。还应指出,在此之前,中国科学院从1985年起就把气候研究作为一个重点支持的基础研究课题,国家自然科学基金委员会从1988年起也把两个有关气候研究的课题作为重点项目给以支持。可以预料,近期我国的气候研究必将发展到一个新的阶段。

气候条件对战争也有很大的影响。任何一场高技术战争,总是在一定的气候背景下进行的。气候环境既可以为军事行动提供有利条件,也可成为军事行动的不利因素。为了减小不利气候对作战行动的影响,

人们必须广泛收集和深入分析整理气候资料,做好高技术战争条件下的气候资料服务工作。当代高技术战争是一场高消耗的战争。选择有利的作战时机,尽可能地缩短战争时间,减少战争消耗,是作战双方十分重视的问题。而作战时机的选择,除了政治、军事和外交等因素外,作战地域的气候条件也是重要的参考因素。作战气候时节选择得好,则有利于发挥高技术武器装备性能和实施各项军事行动,加快战争的进程;相反,作战气候时节选择不当,则会延缓战争进程,甚至陷入战争泥潭。

高技术战争的战略决策层特别注重初战的效果,他们需要最大限度地利用气象条件,以达到突然而猛烈的战略空袭目的。有人曾对海湾战争中美军气象部门的保障情况进行过一些分析和研究,认为在战争时机的选择上他们是比较成功的。美军气象部门在伊拉克入侵科威特之后,就向国防部提供了海湾地区的气候分析报告,指出,“对伊作战的时机应选择从12月至翌年3月内,尽管这一时期阴雨和雾日多,对作战行动有影响,但比起4—10月份高温、风沙天气这种影响要小得多”。而且他们根据战略决策层提出的应在某个无月光、无云和少雾的深夜向伊军发起闪电式进攻的气象条件和作战思想,预报出符合进攻条件的日期是1月17—20日,2月16—18日,3月17—19日。以美国为首的多国部队联合指挥部选择了1月17日对伊实施首次空袭,首批飞机于巴格达时间1月17日0点50分由沙特起飞,凌晨2点30分开始对伊拉克首都巴格达的许多重要目标实施突然空袭。当天夜晚,天气的确晴朗,无月光,多国部队空袭一举成功,使伊防空火力系统猝不及防,未能发挥应有的作用。有趣的是,过了近8年,美英于1998年12月巴格达时间17日凌晨0点49分,又一次进行了代号为“沙漠之狐”的军事打击行动,大规模空袭伊拉克军队的防空、指挥系统以及重要的军事设施。在这次空袭中,美英使用了B-52战略轰炸机,F-117A、F-15B、F-16和旋风等作战飞机,并投放了精确制导炸弹;使用了航空母舰,发射战斧巡航导弹500多枚。美英声称,“沙漠之狐”行动达到了目的,使伊受到实质性的打击。这说明冬季在伊拉克地区实施大规模空袭行动,有着相对有利的气候条件。

在现代高技术条件下,尽管武器系统更加先进,技术装备更加完善,但气候环境对战争的影响始终存在。恶劣的气候环境不仅影响战斗人员的生理和心理活动,而且对作战效率起着严重的制约作用。了解和掌握战区的气候环境,特别是寒区、热区、沙漠、高原等特殊地区的气候对作战人员的影响,对于提高部队在高技术战争条件下野战生存和适应能力具有十分重要的意义。

马岛之战和海湾战争的实践表明,现代军事大国既注重战场气候环境的研究和掌握,又突出了对战场气候环境的适应性训练,使其军队在复杂的气候条件下锻炼的机会增多,战时获胜的把握增大。特别是登陆作战,更需要加强对登陆地区气候环境的研究,有效地利用气候条件为作战服务。马岛之战就很能说明问题。英军平时注重对马岛地区战场环境的研究,对气候特点掌握得比较清楚,并能有针对性地利用冬季到挪威北部山区和格陵兰进行严格的寒区训练。马岛战起,英军即以从气候温和的英国本土到12000多公里外天气寒冷的马岛作战;直升飞机能在大雾弥漫、能见度极差的恶劣环境下实施运输;士兵能在风浪中连续颠簸19个昼夜,平均负重50kg,长途奔袭,迅速实施登陆进攻。与英军形成鲜明对照的是,阿根廷部队多数未经严寒条件训练,对马岛气候的掌握和对严寒的适应能力远不及英军,非战斗减员比英军大得多。据此,我军可选择与登陆地区气候环境相似的地区对部队进行有针对性的训练,以提高部队的登陆作战能力。

总之,气候条件对当代高技术战争有相当大的影响,有时甚至可决定某一战役的胜负。学好本课程则可为以后学习《军事气象》课程打好基础。

§1-1 气候的概念

1-1-1 天气和气候

天气和气候是大气科学中既有联系又有区别的两个不同的概念。通常认为,某一瞬间或一定时段内大气状态和大气现象的综合称为天气;而气候则是长时期的大气平均状态,即长时期的天气的综合表现。天气和气候的空间尺度基本一致,从几公里到几千公里乃至上万公里;时间尺度却大相径庭。天气的时间尺度从几小时到几天、十几天;气候的时间尺度则要长得多,从一个月到一年甚至是几千年、上万年。但是这两个概念有时被混淆了,以致分不清天气和气候到底何所指。我们可以说今天的天气很好,但不能说今天的气候很好;反之,我们只能说今年的气候很好,却不能说今年的天气很好,因为天气和气候这两个概念所包含的时间尺度不同。

大气的物理状态是十分复杂的,在大气科学中通常把它分解成诸如温度、湿度、降水、日照、风向、风速、气压、云状和云量等气象要素,分别表现大气的各种物理属性。世界各地气象台站的定时观测记录以及将这些记录汇总而绘制的天气图,表现了瞬时的大气状态的空间分布,揭示出同一时刻各地区的天气状况。气候则是一种时间尺度更长的大气状态,它不能用瞬时气象观测记录和天气图反映出来,而是根据这些气象要素的统计特征表现出来,因此按照经典的说法,气候就是人气的长时期的统计状态。

所谓长时期的时间范围,通常是指半个月以上时间。由于各地气候存在着明显的以年为周期的序列变化,即气候的年变化,在一年以内某一时段的气候状态都要受到年变化的制约。因此按照经典的说法,气候所指的时间尺度应该是一年以上时期的大气平均状态。

1-1-2 气候变化

世界气象组织(WMO)规定把30年作为描述气候的标准时段,因此气候就用30年内各种气象要素和气象现象的统计性质作为特征值来表示。这个30年为一周期的统计特征是表现气候特征的最短年限,如30年的平均温度、30年的平均年降水量、30年的风向频率等。作为当前阶段相互比较的标准值,规定以1931—1960年这个30年间所得出的气候要素平均值作为标准值。从有气象观测记录以来,将30年的气候平均值加以比较,可以发现它们之间的差别是不大的。但是,从这些看上去似乎相差不大的变化中,仍然可以感受到气候的起伏,如上海1931—1960年这个标准时段的年平均气温为15.8℃,而1896—1925年的30年间年平均温度则是15.2℃。因此在不同的30年内气候处在不断的变化之中,它们既包含了气候的自然变化,也含有人类活动对气候的影响。这种变化因纬度、海拔高度、海陆分布的相对位置和自然地理条件而异,同时随着世界范围的工业化的进展,人类活动所引起的气候变动也是一个重要原因。

用30年作为气候标准时段对于气候研究来说是很方便的。30年的气候要素统计平均值既表现了当前的气候特征,又可对不同的以30年为一统计时段的气候相互比较。各个30年统计时段气候的统计平均值之间的差异称为气候变化,在30年内各个年份之间的气候差异称为气候变率。

气候是地球上的一种自然现象,是一种可为人类认识和掌握的复杂的自然现象。由于气候现象的复杂性,形成气候的多种多样原因,以及人类对气候及其变化的认识随着科学技术的进步而不断深化,不同的人在不同的时代对气候的认识以及有关气候的定义可以相差很大。

早期,有人曾认为气候就是某地天气的平均状态和一般过程(W. Koppen, 1884),或者是各种气象要素和气象现象的总和(А. И. Воейков, 1884, J. Hann, 1908等),气候是天气的总和(Е. Е. Федоров, 1925)。Л. С. Бер(1938)从地理学观点出发,认为气候是地理过程的一部分,他认为一地的气象现象的平均状态可以影响植物、动物、人类以及土壤类型,因此气象现象的平均状态就是气候。他甚至还断言,如果谈论在地球上出现生命以前的气候也许会觉得很荒唐。这个关于气候的定义显然是及其荒谬的,因为在地球上生命现象出现以前至少已经存在着某种能够促进有机化合物出现和适合生命活动过程发展的气候。

J. M. Mather(1974)认为气候是较大范围内较长时期(几天、几个月以至几年)的特征性天气,气候不仅指平均情况,也包括某一地点或地区出现各种天气情况的几率和极端值。这个关于气候的定义与Е. С. Рубинштейн和О. А. Дроздов(1952)所给出的气候定义有一些共同之处。后者不仅指出气候是多年所具有的特征性的天气情况,而且指明气候是在太阳辐射、下垫面性质和大气环流的共同影响下形成的。所谓特征性天气情况,不仅解释为在该地最为常见的天气情况,而且也包括该地在特殊年份的天气情况。

一般说来,气候是与太阳辐射的输入及其转换、海陆分布、地表状况和天气状况紧密相连的。在气候的定义中,不仅要能说明气候是长时期的天气的平均状况,而且还要能反映出一般大气环流特征和地理因素与气候之间的相互联系和相互作用。因此,目前关于气候的定义有一种较为流行的看法就是,在太阳辐射、大气环流、海陆分布和下垫面性质多年来相互影响和相互作用下形成的带有特征性的天气状况。

气候不能被看作是一成不变的自然现象。从地球形成以来,在不同的地质时期,由于入射太阳辐射、海陆分布和下垫面性质的不断变化,气候也随之发生改变。在地球发展的不同阶段,有不同的气候,即使在同一个地质阶段,假定太阳辐射输入相对稳定,地壳运动相对少变,但是大气环流、海洋循环以及海气间相互作用的变化也会导致气候变动。数千年来,人类活动对气候的消极影响也是使气候发生改变的一个重要原因。

人类活动对气候的影响自人类出现之后就已开始,但是从上个世纪以来,由于人口的增加和工业的发展,这种影响才开始明显地表现出来。人口的急剧膨胀必然导致耕地和牧场的迅速扩大从而使森林遭到破坏;工业化的进展又使废气、废水、废渣严重地污染环境,改变大气成分,加剧地球气候变暖的进程。虽然在目前人类活动对气候的影响尚不足以和自然因子相抗衡,但是由于人类活动的广度和深度正在急剧地增加,它作为影响气候的一个重要因子只是时间问题。

作为人类活动影响气候的一个例子,毁林造田是使全球气候变暖的一个重要原因。19世纪初,全世界耕地面积仅有450万km²,约占陆地面积的3%。其后,随着人口的急剧增长,耕地面积也在迅速扩大。日前,在全球陆地总面积15000万km²中,耕地约占10%,达1500万km²,牧场约占20%,达3000万km²,沙漠、冻土约占33%,即5000万km²,森林覆盖面积仅占37%,即5500万km²。遗憾的是,现在每年毁林面积仍以0.4%的速率在

持续着,即每年大约有20万 km^2 的森林被砍伐。按照这样的毁林速率来推算,只需250年左右,整个地球上的森林覆盖将荡然无存。

毁林最为严重的主要是热带雨林的迅速减少。全球热带地区现有森林面积不到2000万 km^2 ,其中46%以上在南美。热带雨林每年被砍伐的面积约11万 km^2 ,而造林速率却远远落后于毁林速度,二者之比在热带美洲为1:10,热带非洲为1:29,在热带亚洲为1:4.5。非洲埃塞俄比亚原来森林茂密,1940年森林覆盖率仍高达40%以上,但1981年卫星图片给出的结果只剩下3%多一点。哥伦比亚在最近几十年森林面积也已减少40%左右。

毁林的直接结果改变了下垫面性质,使地气之间的热量、水分、辐射和其它物质的输送和平衡关系受到破坏,尤其是低纬热带雨林地区,因大片森林被毁,致使温度不断升高,气候发生变化。

人类活动影响气候的另一个重要问题,就是大气中二氧化碳含量增加所产生的温室效应。大气中二氧化碳对入射太阳辐射的阻挡作用很小,但却能吸收地球向上放射的长波辐射,使大气和地表温度升高。近百年来,由于矿物燃料的燃烧每年进入大气的二氧化碳量在逐年增加,目前每年平均约增加1ppm的量级。根据计算,如果大气中二氧化碳含量比现在增加1倍,地球平均温度将增加1.5—4.5 $^{\circ}\text{C}$,极地可升高16 $^{\circ}\text{C}$ 以上,而受影响最大的地区是北半球中纬度。

除了人类活动对气候产生的影响以外,火山爆发所产生的气候效应是使全球温度降低,同样是地球气候发生变化的一个不可忽视的原因。火山爆发是地球上一种自然现象,自有记载以来多次观测到火山爆发后全球气候发生变化的事实。例如,1815年印度尼西亚坦博拉火山爆发后向大气层喷发出大量的微尘,方圆几百公里在熊熊燃烧,灰烬在山间和空中弥漫,遮天蔽日。火山喷发的微尘随风飘移,使全球气候发生巨大变化。据估计全球平均温度因之而降低1 $^{\circ}\text{C}$ 多。1816年,欧洲是两个世纪以来最冷的一年,新西兰变得十分寒冷,以致该年为无夏年。

北美圣海伦斯火山在停息50年后于1980年再次爆发;墨西哥切垦斯火山在1982年爆发后,第一年太阳辐射入射量降低25—30%,第二年降低50%,致使全球温度下降0.3—0.5 $^{\circ}\text{C}$ 。

应当指出,全球平均温度降低1 $^{\circ}\text{C}$,相当于向高纬方向推移1个纬度。14世纪全球平均气温仅降低1.1 $^{\circ}\text{C}$ 、就引起破坏力极大的小冰期出现。地球上在亿万年前出现的冰河时代,其温度只比现在低5 $^{\circ}\text{C}$ 左右。

因此,导致气候变化的原因既有人为因子,也有人类无法抗拒的自然因子。按照目前科学技术发展水平,要想将人类活动的气候效应从气候的自然变化中分离出来还是很难办到的。人为地改变气候因子以便达到改造气候的目的,至少在目前以及可预见的将来还仅仅是一种大胆的设想,但是通过人为地改变下垫面特性达到改良局部地区气候条件的目的,则是一种较为现实而又确实可行的办法,这就是人为改变下垫面性质和状态,使原有的小气候环境朝着有利于人类生活和生产活动的方向发展,这种办法称为人工影响小气候。

§ 1-2 气候系统

1-2-1 气候系统概念

气候系统是20世纪60年代以后出现的一个新概念。气候系统包括大气圈、水圈(海洋、湖泊等)、岩石圈(平原、高山、盆地、高原等地形)、冰雪圈(极地冰雪覆盖、大陆冰川冰、高山冰川冰等)、生物圈(动、植物群落以及人类)中与气候有关的物理的、化学的和生物学的运动变化过程。每种过程的空间尺度和时间尺度可能很大,也可能很小,从短时间发生的、决定局部范围气候特征的小尺度过程,直至持续几年以上的、决定全球气候的行星尺度过程。因此,气候系统实际上是一个包括大气圈、水圈、岩石圈、冰雪圈和生物圈在内的,能够决定气候形成、气候分布和气候变化的统一的物理系统。

一个大的物理系统往往是由相互作用和相互依赖的若干个组成部分结合在一起构成具有特定功能的有机整体,而且这个系统本身可能又是从属于某个更大的系统的一个组成部分。系统内的各个组成部分通常称为子系统,系统与子系统之间具有相对性。

因此,气候系统可以看作是由大气、海洋、陆地、冰雪和生物等几个相互作用和相互依赖的子系统所构成。由各个子系统组成的全球气候系统,简称为地球一大气系统或地一气系统。但是,在决定气候的各个因子中,主要的因子是对气候系统的加热率,太阳辐射则是主要的能源。由于地球与太阳的相对位置的变动,致使到达地球的太阳辐射以一个相当长的时间为周期而发生很大的变化。因此,作为一个子系统,全球气候系统又是从属于一个更大的以太阳为中心的大系统。太阳活动影响地球气候,地球气候又与大气、海洋、生物等子系统具有相互影响和相互制约的紧密联系,这样就产生一个所谓天、地、生相互影响问题。用这个概念去研究气候形成及其变化的规律,可以将错综复杂的关系用系统论的观点加以归纳、整理,从而使气候研究得以化繁为简,条理清晰,内容也变得十分丰富。

1-2-2 系统论简介

系统论是与控制论、信息论几乎同时产生的。一个简单的系统必需具备三个部分,输入、输出和控制装置。一个控制系统是指施控主体对受控客体施加一种能动作用,使受控客体按照施控主体的预定目标而动作,并最终达到这一目标。施控主体作用于受控客体,相反受控客体又以某种方式反作用于施控主体。前者对于后者是控制作用,后者对于前者是反馈作用。控制系统中的施控主体和受控客体之间存在相互作用的关系,控制系统的控制就是在这种相互作用中得以实现,所以控制系统必然是二种动态系统,控制过程必然是一种动态过程。在动态过程中,系统的稳定性是很重要的,需要加入一种反馈机制,使系统的稳定性得以实现。

通常用熵来表示系统的状态函数。熵与温度、体积一样,都是用以表示物质系统的状态函数。例如温度表示物体状态的冷或热,体积表示物体状态的大或小,而熵则是表示物体状态的有序或无序。

热力学第二定律规定,热量总是由温度较高的物体向温度较低的物体传递,而不能自发地由温度较低的物体传向温度较高的物体。换言之,在一个封闭系统中熵总是增加的,故熵在热力学中是用来说明物体热运动过程的不可逆的一个物理量。对于一个与外界既无质量交换又无能量交换的孤立系统来说,一切不可逆过程都会使熵增加,一切不平衡态最终都将趋于平衡。换言之,按照热力学第二定律,孤立系统内部的宏观状态随着时间的推移,总是趋于平衡的。在系统达到平衡状态时,从宏观上看系统便维持在平衡状态而不会出现变成新的具有质的差别的另一种状态的飞跃,也就是说系统内部的宏观状态不再随时间而改变。

但是,应当看到,系统宏观状态的改变与系统微观状态的改变是不一样的,这个问题可以从气体或液体分子运动过程中分子的排列状况得到启示。假定在一个密闭容器中有两种气体,开始它们各自停留在容器的两端,两种气体内的分子排列都处于有序状态。随着时间的推移,两种气体分子在整个容器内扩散而逐渐融合起来,分子间的排列逐渐从有序变为无序。当气体完全混合时,分子排列的混乱程度达到最大。如果将这个例子中的气体换成可以看得见的液体,就会更容易理解。这时假定在一个中间有隔板的容器中盛满水,将一些蓝墨水滴入其中的一边,然后抽去隔板,可以看到蓝墨水将很快地由一边向另一边扩散,最终变成完全一样的浓度。蓝墨水是由一些蓝色的元素构成的,水是由白色元素构成的。在宏观上达到平衡状态时,在微观上则是蓝色元素与白色元素达到完全的混合,这就意味着系统的混乱程度达到最大。

按照热力学第二定律,系统内部宏观状态趋于平衡的现象用熵的增大来描述。在孤立系统中,熵不断地增加,熵的变化总是大于零,一直达到最大值。

因此,对孤立系统而言,宏观上系统不断地趋向平衡状态,微观上则表现为熵在不断地增加,熵的增加标志着系统内部分子运动的无序性增大,有序性减小。系统越混乱,熵越大,系统越有序,熵越小,因此熵代表着系统的无组织程度,是系统的无序状态的量度或者说是系统的无组织程序的量度。

气候研究需要资料,气候资料就是信息。对于气候研究来说,信息是指平均温度、温度、气压、风向、风速、太阳辐射等气候要素。在研究工作中,一个人掌握的气候资料越丰富,他获得成功的把握就越大。因此,信息可以看作是对气候问题了解的不确定性减少的量度。例如我们在对某个气候问题进行研究时,事先可能不知道或者不完全知道预期的目标是否能够实现,可能会出现多种不同的结果。成功、失败、部分成功或部分失败等。在结果未获得前,思想上处于一种不确定的、无序的混乱状态。一旦得知获得成功的消息后,思想上的不确定度(无序状态)也就随之消失。因此,研究结果的获得是解除不确定度所必需的信息。信息是使混乱的系统有序化所必需的,通常用信息熵表示系统从无序到有序以及解除不确定度所需信息的量度。

因此,一个系统有序程度越高,热力学熵就越小,但其所包含的信息量越多,信息熵也就越大;相反,系统的无序程度越高,热力学熵就越大,但其所包含的信息量越少,信息熵就越小。信息熵与热力学熵互为相反数,信息熵就等于负的热力学熵。信息熵是一个系统有序化程度的量度,热力学熵是系统无序化程度的量度,它们的物理意义正好相反。因此,信息熵不是刻划系统的无序状态,而是刻划系统的有序程度,表明系统获得信息后,无序状态的减少或消除。

一个系统,按照它和环境的联系可以分为三类:孤立系统、封闭系统和开放系统。孤立系统是指与环境不存在任何物质和能量交换的系统。在孤立系统中,宏观上总是随着时间的推移而趋向平衡状态,微观上系统内的熵不断增大,分子运动的无序性增加,有序性减少,同时意味着信息的丢失。在自然界中很难见到这类系统。

封闭系统是指与环境不存在物质交换,只存在能量交换的系统。地球一大气系统在宇宙空间中就是一个封闭系统,它从太阳获得能量,同时也以长波辐射形式向宇宙空间逸出能量,而地球大气与宇宙空间的物质交换事实上可以略去不计。

开放系统是指与环境之间存在着物质和能量交换的系统。与孤立系统不同,开放系统的内部状态随着时间的推移,无序性总是自发地减少,有序性总是自发地增加。这类系统完全不遵守热力学第二定律,而是遵循达尔文进化论,明显地表现出自组织性,故开放系统又称为自组织系统。就大气子系统而言,通过海气和陆气交换,大气与陆面和海洋不断地进行着物质交换和能量交换,并在交换过程中逐渐趋于稳态平衡状态。所谓稳态平衡是指系统的属性在一定的时间间隔内维持不变,但它的瞬时状态可以改变,例如,寒潮爆发、梅雨等都可作为稳态开放系统的例子。开放系统需要有能量输入,才能维持和存在下去。如果一个开放系统依靠消耗自身的能量或物质得以维持和存在下去,这个系统就称为衰减系统,在干燥天气下河流的干涸过程就是一例。

如果开放系统的能量输入具有周期性,这个系统就称为周期系统。例如到达地球的太阳辐射具有以日和年为周期的输入,这种周期性的输入使地球上的许多自然系统成为周期系统,陆地表面的热量平衡和辐射平衡具有明显的日周期和年周期,气温的变化反映了地表的热力平衡状态,也具有相应的日周期和年周期。如果开放系统的能量输入是随机的和无规律的,这个系统就称为脉动系统。脉动的出现不可预测,也无法预知其大小,例如流体中的湍流、温度脉动和风速脉动就是脉动系统的例子。一般说来,时间尺度和空间尺度都很小的开放系统,基本上都具有脉动系统的性质。

比较复杂的开放系统往往是由一连串大大小小的子系统组成,一个子系统的输出成为下一个子系统的输入,较复杂的子系统可以有几个输入和输出,子系统之间由一级级的质量和能量连接在一起。大系统与子系统之间,子系统与子系统之间都由一定的控制器来调节输出。因此开放系统实际上构成了一种梯级系统,大气中水分循环就是这种梯级系统的一个例子。海洋是水的储存库,在太阳辐射作用下水体增热,通过蒸发进入大气,大气中的水汽是水的另一个储存库。海洋上空的水汽通过大气环流输送到陆地上空,并以降水的形式向陆地表面输出,降水的输出成为进入植被、土壤和岩石的输入,最终在重力作用下通过表面径流和深层径流的形式输入海洋,海洋又以蒸发的形式成为进入大气储水库的输入源。海洋—大气之间的水分循环系统是由一连串的子系统构成,海洋子系统的水分输出成为大气子系统的水分输入,大气降水的输出又成为陆面水分的输入,上一个子系统的输出构成下一个子系统的输入,而控制各级子系统的输入输出的调节器则与太阳辐射、大气环流和下垫面性质有关。应当指出,陆面在获得水分输入时,一方面以径流形式最终流回到海洋,但是陆面蒸发作用也是水分进入大气的一条途径,水分内循环促使陆面上空降水量的增加,因此陆面蒸发在整个水分循环中起着回输作用,这就是水分循环系统中的反馈机制。在自然界的许多开放系统中,反馈起着控制输出的作用。

1-2-3 气候系统简述

气候系统是那些能够决定气候形成及其变化的各种因子的统一体。由于气候的时间尺度和空间尺度不同,仅考虑上下边界层之间的大气层是不够的,必需考虑气候系统的各个组成部分。按照世界气象组织的意见,完整的气候系统应包括五个物理成分:大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈,如图1.1所示。

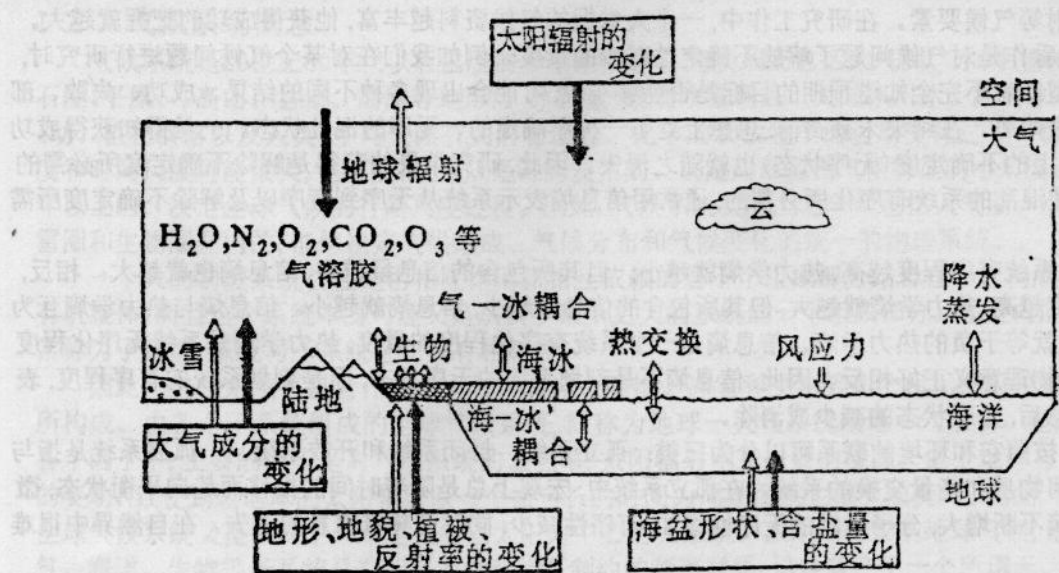


图1.1 气候系统示意图(引自GARP, 1975)

实箭头表示气候变化的外部过程,空箭头表示气候变化的内部过程

现将气候系统的各个组成部分简述如下:

(1) 大气圈

它是地球的气体包围圈,也是气候系统中最活跃的、变化最大的组成部分。通过铅直的和水平的热量传输,大气圈对于外部施加的影响的响应时间约为一个月。如果没有补充大气动能的过程,动能因摩擦作用而耗尽的时间大约也是一个月。

(2) 水圈

它包括海洋、湖泊、河流和地下水,也包括地表上空的液态水,其中海洋对气候变化最重要。海洋吸收到达海表的大部分太阳辐射,由于海水的质量和比热容都很大,因而成为一个巨大的能源库。海洋输送的热量约等于大气由赤道向极地输送的热量总和。海洋上层与大气、或与海洋表面冰的相互作用,时间尺度为几个月到几年,而海洋深层的热力调整时间则长达几个世纪。

(3) 冰雪圈

它包括陆地冰、冰川冰、海冰、地面雪被以及湖冰和河冰。雪被和海冰有很大的季节性变化,而冰川和冰原的变化要缓慢得多,它们的容积要在几百年以至百万年之内才有明显的变化,这种变化则与海平面变化有着密切的联系。

(4) 岩石圈

它是由地表上的大片陆地构成的,包括山脉、洋底、地表岩层、沉积物和土壤。在时间尺度上,岩石圈特征的变化是气候系统中变化最缓慢的成分,其时间长度可与地球本身的年龄相比拟。

(5) 生物圈

它是由陆地上和海洋中的生物体所构成,包括植被、森林和各种各样的动物。生物界对气候最敏感,而其本身又会影响气候变化。地表变化的特征时间差异很大,农田为数周,大片森林可长达数十年或数百年。

气候系统各个组成部分之间的相互作用是多种多样的,陆地、冰雪和海洋表面之间的能量和物质交换可以通过各种渠道在各种时间尺度内发生。同时,地表也是空中各种浮悬微粒的重要来源,例如火山灰、沙漠尘埃、花粉、孢子和海水飞沫中的盐粒。这些微粒同大气中的微量气体如二氧化碳等一道,反过来又通过大气辐射过程对气候产生重大的影响。

J.G.Lockwood (1985)在《World Climatic System》一书中,从气候学研究角度出发,将气候系统分为六个子系统:大气子系统、海洋子系统、冰川子系统、干旱子系统、草原和植物子系统以及森林子系统等。他认为,驱动大气子系统的原动力是辐射分布和起因于地球自转产生的斜压不稳定性。大气子系统与各个子系统之间通过各种复杂的反馈作用形成各种不同的气候特点。这是目前关于用气候系统概念研究气候成因的一种尝试。

气候系统作为一个开放系统,其主要的能量供应来源于太阳。输入的太阳能在各个子系统中经过一系列转换后,又以长波逸出辐射形式返回宇宙空间。因此,气候系统中的能量具有多种形式,主要的有:辐射能、热能、势能、动能、化学能和电磁能。这些能量可以从一处传输到另一处,并能改变周围环境的物质属性,它本身也可以从一种形式转换成另一种形式。能量的转换和传输完全遵循能量守恒定律。

气候系统中的辐射能主要指太阳辐射和红外辐射而言,它们都是电磁辐射的一部分。由于自然环境中几乎所有的可用能量的最初来源都是来自太阳光谱中的可见光部分,故辐射的输入和输出,对气候系统来说极为重要。热能、动能以及其它的能量形式都是气候系统内部各种过程的输入或输出,对气候系统的各个组成部分来说也是重要的。

1-2-4 气候系统中的反馈过程

在气候系统内部发生的相互作用中,存在着大量的反馈过程,它们起着从内部调节气候系统的作用。反馈过程表明气候系统各组成部分之间的耦合或相互补偿作用。

所谓反馈,就是将一个系统的输出回输到输入端,从而对系统的运行过程进行调节和控制。如果反馈过程能够使系统的运行得到进一步的发展,称为正反馈,反之,称为负反馈。负反馈是系统的控制机制,正反馈使系统失去控制,并使输出越来越偏离预期的目的。例如,长波辐射和地面温度的关系是负反馈的一个例子。当地面温度升高时,地面向上放射的长波辐射增大,意味着地面用于支出的热量增加,因而促使地面温度降低,这就是负反馈。又如人射太阳辐射使地面增温,对流加强,对流运动所形成的云阻挡了地面进一步接受太阳辐射,因而使地面的增温受到抑制,这也是负反馈。空气绝对湿度与温度的关系是正反馈的一个例子。当温度升高时,水面或湿润表面的蒸发加强,空气绝对湿度增大,地面长波有效辐射减小,因而促使温度进一步升高,这就是正反馈。又如气温的增高将使冰雪覆盖范围减小,全球反射率必然随之降低,这就意味着有更多的太阳辐射被地表吸收,结果地面温度进一步升高,这也是正反

馈。

气候系统中的反馈机制对气候变化具有很大的意义。正反馈作用使气候要素的异常增大,因而使气候的稳定性减小;负反馈作用使气候要素的异常减小,因而使这些要素值接近于各自的气候标准值。气候的不稳定性是由气候系统内部的正反馈机制控制着,而气候的稳定性则是由气候系统内部的负反馈机制调节并维持着。从气候的自然变化过程中可以看出,任何正反馈作用必将由另一些调节过程的介入而稳定在某一水平上,否则地球气候将失去控制而变得一发不可收拾。温室效应作为气候系统中正反馈作用的一个例子,地面温度因水汽、二氧化碳以及其它微量气体的增加而升高,地球气候变得越来越暖;但是火山活动加剧所喷发出来的大量火山灰,能有效地阻挡入射的太阳辐射,使地面温度降低,这就是气候变化中的阳伞效应。温室效应使气候变暖,阳伞效应能抑制气候变暖,因此气候的自然变化总趋势有可能维持在某一个稳定状态,并在这个水平线上来回振荡。

气候系统中存在着许多反馈作用,弄清反馈过程的机制和原理,在气候变化的研究中是一个极为重要的问题。但是,目前对同时发生的许多反馈过程的相互作用还没有完全认识清楚。为了分析人类活动对气候的可能影响,就必须对气候系统中的反馈机制及其相互作用问题有比较透彻的了解。这里给出几个反馈的例子,有的是正反馈,有的是负反馈,它们对气候的影响都是比较重要的。

(1) 水汽—辐射反馈

低层大气对红外辐射的不透明度基本上决定于大气中水汽的绝对含量。在相对湿度保持不变的条件下,气温上升使水汽含量增加,从而增加对地表射出长波辐射的吸收,结果使低层大气的温度进一步升高。因此,气温与水汽的耦合作用使气候系统产生不稳定。这种反馈是正反馈,也是地球大气产生温室效应的原因,故水汽—辐射反馈也称水汽—温室效应正反馈。

(2) 冰雪—反射率反馈

冰雪表面对入射太阳辐射具有很大的反射作用,它是支配极区气候的一个重要因子。地球表面冰雪覆盖的面积却大大地取决于气温。全球温度的降低,将导致地球表面冰雪覆盖面积的扩大,从而引起全球反射率的增大,这样又使地球一大气系统吸收的太阳辐射减少,从而使温度进一步降低。在其它因子不变的条件下,温度的下降造成冰雪范围进一步扩大,并使温度更加下降。冰雪覆盖与反射率这种耦合作用是气候变化正反馈机制的一个明显例证。

冰雪覆盖—反射率之间的正反馈作用,在冰雪覆盖出现部分消融时也表现得很明显。例如当出现冰雪部分消融时,地表反射率降低,对太阳辐射的吸收增加,从而使下垫面温度增高,冰雪消融进一步增加。这是冰雪覆盖与反射率正反馈机制的又一个例证。

(3) 云量—地面气温反馈

地面温度随着吸收更多的太阳辐射而升高,将促使地面蒸发加剧,从而导致大气中水汽含量增加,促使云得到发展,云量的增加使入射到地表的太阳辐射减少,地面温度随之降低,这是负反馈的一个例子。大多数云既能吸收地球向上放射的红外辐射,也能反射入射的太阳辐射,云量是决定全球辐射平衡的一个重要因子。因为云顶温度低于云下面的地表温度,云作为辐射体,使得地球向宇宙空间逸出的红外辐射因云的存在而减少。同时,云顶反射掉的入射太阳辐射也取决于云量。云量增大的结果将使地面温度降低,这是云量与地面温度之间负反馈作用所产生的结果。根据全球平均的一维模式计算结果表明,只要全球平均云量变化百分之几,或者云顶高度变化几百米,就会引起全球平均地面温度改变 1°C 左右 (S. H. Schneider 等, 1972)。这个负反馈机制涉及到温度、太阳辐射、红外辐射以及云量和云高等多种要素。但是地面温度的改变通过反馈作用使云量发生变化的完整机制还没有完全搞清楚,这是目前气候理论上的一个主要问题,只有对观测资料进行大量分析,以及对气候模式进行敏感性研究后,才有可能获得解决。

(4) 二氧化碳—海洋—大气反馈

由于大量燃烧矿物燃料,使大气中二氧化碳含量增加,导致低层大气温度升高,海洋表层水温也随之升高,海水的垂直稳定度因而加大。这样便使海洋吸收二氧化碳的能力降低,海洋已吸收的二氧化碳由于海温升高而使海水的酸度增加,同样降低海洋表面吸收二氧化碳的能力。其结果是使大气中二氧化碳的增加速率越来越大,低层大气增温越来越明显。这是另一种引起气候变化的正反馈过程,这个过程将物理系统和生物化学系统联系起来,其形成机制与水汽—温室效应正反馈作用相似,所以也可称为二氧化碳—温室效应反馈。

应当指出,整个气候系统中各个组成部分之间的相互作用和反馈过程是极为复杂的,不能孤立地考虑其中一个过程而忽略其它过程。从总体上来看,在一个相当长的时间间隔内,地球气候的自然变化趋势是相对稳定的,这是由气候系统内部各种过程的相互作用和相互依赖所决定的。按照系统论的概念来研究气候,就必须树立 1) 全局性:从影响气候形成和变化的各个因子的总体考虑出发,提出目标,从整体

上考虑系统与子系统之间的关系；2) 关联性：气候系统中各个子系统之间都存在着相互作用和相互依赖的有机联系。对子系统的输入和输出之间的关系、子系统之间的层次联系、系统的各个组成部分中参数和变量与系统的特定功能之间的关系，必须设法定量地加以描述；3) 择优性：系统的核心问题是解决最优化方法问题，设计和使用系统的最终目标是使之完成特定的功能，即达到最佳效果，这就要求有最优计划、最优设计、最优控制和最优管理，即必须选择优化的系统方案，以便得出最佳结果；4) 综合性：由于气候系统涉及面广，不但有技术因素，还有经济因素、社会因素，因此需要综合考虑；5) 实践性：气候系统的设计和使用离不开实践，在实践中不断探索、改进、完善，一定能获得好的结果。

§ 1-3 当代气候学研究

1-3-1 经典气候学和当代气候学

当代气候学研究的主要任务是预测气候变化。与本世纪的前50年相比较，气候学的概念已经发生了深刻的变化。按照传统的气候学定义，一个地区的气候是指某种统计的平衡状态，它用一些参数(气候因子，如风、温、湿、压力等)的统计平均值来描述(或定义)。在这里“统计平均”是指根据较长时段的样本所得出的平均值。在50年代初，世界气象组织曾规定取40年的平均就可以称为平均。但气候的平均值表示不出气候的变异性，因此，在经典气候学中，用“极差”(最大值减最小值)和“标准离差”来描述气候的变异性。50年代以后，人们发现一个地区的气候并不处在统计的平衡状态，而是经历着各种不同尺度(如年际尺度、十年际尺度、百年际尺度以及千年际尺度等)的变化。可以这么说，在50年代以前，人们是把气候当作静态来研究，而当代则是把气候看作是不断变化的。经典气候学的任务是描述某个地区的气候特点，而当代气候学则要求预测某个地区或全球范围的各种时间尺度的气候变化。WCRP中提到的三个目标就是从气候是在不断变化着的观点出发的。在这里，围绕着平衡状态的扰动，或即对平衡状态的偏差或距平，正好是我们需要进行预测的对象。

与此相关，传统的气候学在阐明气候和生态(主要是植被)的关系时采用气候带(climatological zone)概念，如温湿型气候带、亚热带气候带等等。无疑，当代气候学中气候带仍旧是有用的概念(也许需要更客观的定义，以消去一些人为的规定)，但为了描述气候异常或气候距平的全球分布，揭露不同地区距平之间的相互关系及其中的动力学问题，我们需要引入另一个概念，即气候或气候距平型(pattern)以及与此相关的所谓“遥相关型”(teleconnection pattern)等。显然，统计平衡状态下的气候带和偏离平衡状态的气候距平型并不是一回事，它们也不重合。

当代气候学不同于经典气候学的另一个特点，在于引进了“气候系统”(climate system)的概念。经典气候学着重描述各个气候因子的特征，即只考虑大气本身的一些参数。当代气候学主要研究气候变化，而决定气候变化的因子不单是大气内部的种种过程，还决定于发生在大气上边界和下边界处的各种物理和化学过程。因此，我们在研究气候时除考虑大气自身的变化外，还需要考虑海洋、冰雪覆盖、陆地表面、地球上生物分布以及大气上边界处太阳辐射和大气内部成份变化等对气候的影响。因此一个完整的气候系统应包括对气候形成和变化有直接或间接影响的各个环节。除太阳辐射这个主要的能量源之外，气候系统包括以下5个成员或子系统，即大气、海洋、冰雪圈、陆地表面和生物圈。这就是说，气候的形成和变化不仅是大气内部的状态和行为的反映，而且是与大气有明显相互作用的海洋、冰雪圈、陆地表面及生物圈等所组成的复杂系统的整体行为。各子系统内部以及各子系统彼此之间的各种物理、化学乃至生物过程的相互作用决定气候的长期平均状态以及各种时间尺度的变化，从这种意义上说，现代的气候学从概念上已经不再是过去常常被作为气象学或地理学的一个分支的经典气候学，而是大气科学、海洋学、地球物理和地球化学、地理学、地质学、冰川学、天文学、生物学以至社会科学等众多学科相互渗透共同研究的交叉科学。

在研究方法上，当代气候学和经典气候学也有明显的不同。经典气候学中的统计方法和定性的描述方法在地理气候学中是有用的，近代气候学更需要推理和定量的研究，而当代气候学则要求对气候系统进行定量观测和综合分析，并对气候形成和变化的动态过程进行理论研究和数值模拟。在观测研究方面，WMO有一个“世界气候资料计划”(WCDP)为气候研究提供必要的资料。此外，还组织了一系列国际性观测试验。例如，“热带海洋和全球大气计划”(TOGA)、“世界海洋环流试验”(WOCE)、“海冰预测国际气候试验”(SIPICE)、“国际卫星陆面气候学计划”(ISLSCP)、“国际卫星云气候学计划”(ISCCP)等等。此外还有更多的区域性的，或为研究某些特殊过程的专门观测试验。组织这样众多的全球或区域规模的观测，并充分利用卫星遥感资料，即是现代气候学研究中的一个重要特点。同时，观测资料中有许多是用来描述气候系统各成员之间的相互作用过程的。可见，当代气候学的信息量比经典气候学要多得多，必须发展专门的气候资料和信息系统才能适应研究和应用工作的需要。当代气候学研究的另一个显著特点是研究气候

系统的数学物理模式, 高度重视相互作用过程的物理—动力学理论研究以及对气候形成和演变的数值模拟。人们认为, 必须利用比较完善的、有坚实物理基础的气候模式, 才能定量地考虑复杂气候系统中各个成员之间的各种相互作用并展现气候变化过程, 方能准确理解气候变化的机制, 并使气候预测的可能性得以实现。

目前, 用数值模式模拟气候虽已取得很大的成功, 但由于气候系统的复杂性使模拟结果仍存在着很多问题。例如, 大气中CO₂加倍对气候的影响程度问题, 不同的模式给出了不同的结果, 甚至差别还很大, 因此对这一问题尚无确定的回答, 只能给出一个大致的变化范围(如, 全球平均温度增加1.5—4.5℃)。这种不确定性是由于在气候模式中人们对一些重要过程的认识及描述方法有重大缺点, 其中云和辐射的相互作用问题就是一例。辐射过程不仅决定于各层云量, 还决定于液态水含量、滴谱分布和相态, 目前模式计算或参数化方案尚不能很好给定这些量的分布。其它如大气中微量成份和气溶胶对辐射过程的影响、水份循环过程、海洋过程(包括海洋环流动力学过程和通过海气交界面的动量、热量与物质交换等)都是迫切需要加以研究的问题。

1-3-2 月和季节气候距平的监测和预报

按照WCRP, 现阶段主攻目标是建立月和季节时间尺度的气候预报, 即预报月平均和季节平均气候量的距平值。

如果我们要作的“气候预报”的对象是出现在该地区和该时段内某个气象量的某种平均, 并求出它相对于多年平均值的偏差(即距平), 那么对于月和季节时间尺度的气候来说, 它确实可以理解为在该时段内出现在该地区内各种天气系统的群体行为的总结果。以一个月来说, 这个时间尺度比天气系统或天气过程的特征时间尺度大不了很多, 约为5:1, 因为一次天气过程的平均周期约为6天。由此可见, 在月或季节时间尺度内, 平均量在很大程度上保留了“样品”的个性或个别行为, 盛行的天气系统群甚至持续时间较长的单个天气系统就足以决定距平值。天气动力学的研究表明: 中高纬度的阻塞高压是相对稳定少变的, 可以维持两周甚至更长时间; 在热带和中低纬地区, 尤其是在季风区内, 盛行2—3周或30—50天的低频振荡; 南北半球的相互作用, 东亚大槽和副热带高压等的异常, 以及反映全球规模的行星波异常或大气环流异常的事件, 都可以维持相当长时段, 或者至少可以造成有利于某种天气系统盛行于某地的“环流背景”。因此, 这些具有鲜明异常性特点的“大型天气过程”及其由一种型向另一种型的转变, 或由一种季节特性向另一种季节特性的“突变”, 不仅对中期天气预报而且对月至季度的气候预测都有重要意义, 也是当代气候学的重要研究对象。

上述这些具有较长持续时间的大型天气过程, 或者对非大样本进行统计平均所得的平均量, 主要是反映了大气内部的动力学过程, 所以在做月至季节时间尺度的气候预测时, 必须有全球规模的有关大气内部运动特征的初始条件。其次, 在月至季节时间尺度内, 边界条件以及外源的强迫作用的积累效果已能充分反映到大气运动中来。所以, 对于短期气候预测来说, 还必须知道这些边界条件, 以及有较准确地描述大气与这些边界条件紧密关系的物理—动力过程模式。现已知道, 海面温度以及大陆和海洋上的冰雪覆盖一般在1个月甚至1个季度内可以大致认为是稳定少变的, 所以可以把它们看作不随时间而改变, 或用简化的方法考虑大气对它们的影响以及它们自身随时间的变化。在某些特殊情况下, 甚至可以把它们作为预报因子, 或者还可以根据大气环流对这些下边界条件响应所产生的“遥相关型”直接作气候距平的预测。至于其它一些过程(如某些陆地表面过程), 由于变化的时间尺度不大于月、季尺度, 就必须和大气环流一起计算。这样, 边界层的物理—动力过程, 以及云雨和辐射的相互作用、地形影响的较准确计算等, 就成为当代气候模式设计中必须着重加以研究的新问题。

毫无疑问, 为了提供作月至季节时间尺度气候预测所需的初始条件和边界条件, 必须有覆盖全球的观测资料。按照WCP, 常规观测资料由强化的世界天气观测网(WWW)提供。在热带和低纬地区, 尤其是海洋表面温度由TOGA计划的观测系统提供。而ISCCP“国际卫星云气候学计划”、ISLSCP“国际卫星陆面气候学计划”和SIPICE“海冰预测国际气候试验”等则提供海洋、冰雪、云盖和辐射等的长期平均气候背景资料或某些特种资料, 特别是提供验证陆面过程、边界层模式和云雨与辐射相互作用的实测对比资料。

在观测系统设计方面, 尽管人们已投入了最大限度的注意力, 但现实可能提供的观测资料在覆盖面、分辨率和精度等方面仍然是不够的, 尤其是在广大的热带和常规观测难于达到的广大洋面、两极及高原地区。因此, 资料的同化及插补以及以大气环流为主体的气候模式的设计问题, 都成为建立可供实用的模式的重要组成部分。同时, 探讨以至确定由于初值和边值误差的传播和模式内参数的误差影响所引起的预报时效和可预报性程度以及敏感性试验(sensitivity study)也成为重要的研究课题。

1-3-3 半年以上至年际气候变化和气候异常的监视和预测

和月至季节时间尺度的气候变化相比较, 人们现在对半年至数年时间尺度的气候变化的认识更不显

足。因此,人们提出的预测不能象对月至季节预报所要求的那样带普遍性以及那样具体和确切,只能预测有无比较强的异常事件出现,同时在定量上最多只能分成3—5个等级(如,雨量偏多甚多、偏多、接近正常、偏少、偏少甚多)或只有正负两档(偏多、偏少)。

目前人们对半年以上时间尺度气候异常过程的认识,主要局限于一些“强信号”(strong signal)过程。了解得稍多的是与所谓厄尔尼诺和SO(南方涛动)或合称为ENSO过程有关的全球气候异常事件;还有低纬度地区大气过程的准半年振荡和准两年振荡等甚低频变化;以及一些人们虽已得知其存在,但规律性很不清楚的所谓韵律过程(rhythm);此外,还有象70年代非洲大陆的持续性大旱和中国华北的变干旱等具有10年以上时间尺度的气候异常,但人们对这类气候异常了解更少。人们必须积累更多的观测资料以及可供这个目的使用的间接资料,并对它们作更多的统计和诊断分析,以了解更多、更确切的事实及其机理。

已有的研究表明,ENSO事件首先出现在海温异常和海洋垂直环流异常之中,海气的相互作用毫无疑问是形成气候异常的一种重要机理。近年,人们甚至提出ENSO也可能是首先由大气环流异常引起的,并且还发现在中纬度北太平洋及其邻近地区还有北方涛动(NO)的大气环流异常现象。人们推测,大气环流的初始状态在半年(甚至年际)预测中仍旧起着一定的作用;同时,海洋内部的动为过程、冰雪分布的异常和演变过程以及它们和大气过程的相互作用都是必须同时计算的。因此,必须有一个包括海—气—陆(冰)相互作用的完整过程的复杂气候模式,即所谓海—气—陆完全耦合模式(fully Atmosphere-Ocean-Land coupled Model)。在这里,短期(月至季节时间尺度)气候预测所用的精细大气环流模式,同样是需要的。但海洋环流(包括表层和深层)及由此而带来的海洋热量的垂直和水平方向上的传递都是重要的,必须跟大气过程一起将这些传递量预报出来;海冰变化方程以及陆地积雪的演变方程等也必须建立,并使之与大气过程耦合起来。

在世界气候研究计划中,有提供年以上至年际气候变化预测所需各种资料的观测系统。其组成包括为监测月至季节气候变化而设置的观测系统(WWW和TOGA),还有为观测和模拟大洋内部(包括表层和深层)动力过程(如海流及海温、盐份的分布)而设立的WOCE计划(WOCE主要服务于WCRP第三个具体目标,同时也服务于第二个目标),以监测极地冰盖为主要内容的SIPICE计划以及ISCCP等。此外,人们正在拟议另一些特种观测试验。很多对比分析表明,频繁和强烈的火山喷发给大气(尤其是平流层)带来大量气溶胶粒子,并影响大气的辐射过程,从而在某种程度上也导致气候异常。因此,人们也有监测火山活动的设想。

如果把半年期气候异常的预测规定为预测半年后的半年内气候距平的平均值(例如,偏冷、偏暖:偏旱、偏多雨等),同样,把年度气候预测规定为未来一年内的气候距平的平均值(例如,年平均雨量的丰欠等)或未来一年内的冬、夏各半年的平均值(例如,冬偏暖、夏偏冷等),那么,不难想象,预测的对象是一个包括大气、海洋、冰雪和地面在内的复杂的气候系统,它在观测所得到的初始状态下和来自系统外的强迫(如太阳辐射及某些地面过程)作用下,经历种种变化而达到预定时段内的统计平均结果。在这里海温等因子不再作为边界条件,而是作为初始场和预报量输入到气候数值模式或概念模式中去;而且初值条件,不仅包括大气的,也包括海洋、冰雪、陆地等的;并且不仅包括有某瞬时(例如,一天或一周的平均)的状态,可能还需要某些统计平均的量。因此可能要用到一个月、一个季度或更长的时段内的资料。此外,带有滞后效应的不同时段的相关统计分析也是需要的。

这样的复杂气候系统包括时间尺度很不相同的许多过程及其相互作用。如果人们能够刻画出这些相互作用的统计特征及由这些作用所引起的较长时间尺度过程的演变,那么,人们也就可以对模式进行简化。不过,目前我们尚不知道这样做在理论和实践中是否合理和可行。目前,除了利用各种预报因子作定性的半年至年度气候异常预报试验以外,主要是利用数值模拟方法研究象ENSO等强异常事件的预报可能性和进行敏感性试验。由于监测海洋内部环流的困难性以及观测网不可能覆盖所有需要资料的区域,海洋环流等的资料同化也是一个很艰巨的任务。

1-3-4 十年至百年时间尺度气候变化趋势问题

在世界气候研究计划中,十年至百年时间尺度气候变化问题主要是估计人类活动(特别是工业)的累积效果在多大程度上影响未来的气候状态和环境生态。自世界工业化以来,大气中的CO₂已增加近一半,预计到2030—2050年,大气中CO₂含量将可能增加一倍。CH₄以及其它具有温室效应的微量气体的增量更大。这些具有温室效应的气体含量的增加会引起大气中辐射过程的改变,从而引起气候的变化。问题是这种影响能有多大?应该指出,这里所谓气候状态是指几十年甚至百年的统计平均,也就是一种统计平衡状态,它接近或甚至符合经典气候学的气候定义。人们知道造成灾害的极端状态跟平均状态的变化趋势是同等重要的,所以,人们要求在估计未来气候变化时也应该包括有灾害性气候事件出现的频率及极端状态。

其次,在作国民经济长远发展规划时,我们还需了解未来十年或更长时段内的气候条件,例和气候对

农业是否有利,从而确定应采取措施等等。人们在问:70至80年代持续了十余年的非洲干旱是否会继续维持下去?几乎是在同时期出现的华北变旱趋势是否已经停止?有否向相反方向发展的趋势?这种十年至几十年时期的气候变化未必是由于全球性的CO₂和CH₄等大气成份的改变所致,是否会由于非洲和我国华北地区不合理的开发所致?抑或自然界中本来就有这种类型的异常?对这些问题的回答是很重要的。目前人们对人类活动的影响效果众说纷纭,还没有可使人信服的理论结果或证据。但大气中有温室效应的微量气体含量在迅速增加,地球上大范围植被的覆盖面积在改变,这无疑将在一定程度上影响气候状态,这些都需要作细致的研究。至于自然界本身就有这种气候异常的现象出现则是可以肯定的,因为从对历史资料和历史事件的分析中已发现,在未进行大规模开发之前,确有过持续十年或更长时间的灾害性的气候异常状态,而且往往是交替出现。如久旱之后可有水涝时期,但对其持续时间、间隔时间等都难说出确定的规律。人们发现从一种气候状态转至另一种状态往往有突变性,而且这种突变的空间分布也是比较规则的。人们还发现有持续百年以上的气候异常,例如,欧洲曾出现百年平均气温偏低的所谓小冰河期,而这个时期相当于我国南宋朝代;据历史记载,此时长江下游冬季出现大寒和长江封冻(由于当时记录不足且不够准确,人们尚不能确切地知道温度偏低多少,以及负温度距平区的分布)。这些十年乃至百年期的气候变化也许是气候系统演变过程中所固有的,也许是由于气候系统外界条件受扰所致。例如,太阳辐射的变化、地质事件(如火山活跃期或地幔向地表的传热及热斑的变化)等,也许还有地球固态、液态、气态动力相互作用导致地轴和旋转速率的变化。但至今,人们对这些因子的作用的认识远不如对天文因子那么清楚(人们已经知道,由于地球轨道参数等的变化可引起数千年以及更长时间尺度的气候变化)。

为了研究十年以上时间尺度的气候变化,必须积累更多的、时间系列更长的资料;必须对气候及可能引起其变化的因子(如大气化学成份、环境和生态状态参数以及太阳辐射和某些地理或地质过程)进行全球规模的长时期的观测;必须对这些过程相互作用的机理进行特种观测;必须设计包括有这些相互作用过程的气候模式并进行数值模拟;这些也是世界气候计划正在进行或拟规划进行的内容。

显然,对大气化学的监测是很重要的,没有这种监测,人们就无法确定大气中CO₂及其它温室效应气体含量增加的速率。目前正在制订全球性的大气化学监测计划。其困难是对海洋和陆地以及生物圈对CO₂等气体的吸收和放射过程并不清楚。因此国际上正在设计一个“全球变化”(Global Change)计划,即“国际地圈—生物圈计划”(IGBP),这是一个比单独研究CO₂含量增加引起气候变化问题更广泛的计划,它包括气候和环境生态变化在内。

在数值模拟方面,必须首先设计更精确的气候模式,其中应包括上述的生态和地球化学过程。但遗憾的是现在尚未有一个这样的模式,只有对各个过程分开来研究的粗略模式或极为简化了的只考虑全球平均或纬圈平均的统计平衡模式。因此,目前的模拟结果在不久的将来也许会有很大的修正。

§ 1-4 气候的诊断

1-4-1 气象要素在空间和时间上的统计分解

为了研究某一地点的气候,通常要计算时间平均及其偏差。任意变量 A 可以写为

$$A = \bar{A} + A' \quad (1-1)$$

其中 $\bar{A} = \frac{1}{T} \int_0^T A dt$, T 是积分时段。偏差的平均总量定义为零,

$\bar{A}' = 0$, 而偏差的平方不是零,这样即给出了方差 $\overline{A'^2}$ 。 A 的平均向北输送可以写为:

$$\overline{VA} = (\bar{V} + \bar{V}')(\bar{A} + \bar{A}') = \bar{V}\bar{A} + \bar{V}'\bar{A}' \quad (1-2)$$

其中第一项表示时间平均流的输送,第二项表示瞬变波或涡旋输送。如果人们对所包含的涡旋时间尺度有兴趣,可用时间Fourier分析把这一项分解,然后决定输送的主要模。这里我们考虑瞬变扰动的总和。对于大气中的水平输送,时间尺度从几天到几个月的涡旋是最重要的;对几个月的较长时间尺度来讲,涡旋是指包含在时间平均输送项中的准常定涡旋。瞬变和平均现象之间的区别有一些任意性,取决于所选择的平均的时段,例如月、季或年。

由于大气的一些量接近纬向对称,也为了简化三维图象,我们常常也使用纬向平均过程

$$A = [A] + A^* \quad (1-3)$$

其中 $[A] = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} A d\lambda$, 为纬向平均量。 A^* 表示和纬向平均量的偏差。同样, $[A^*] = 0$, 但纬向方差 $[A'^2]$

一般不为零。对于 A 的穿越纬圈的向北输送,我们有

$$[VA] = [V][A] + [V^*A^*] \quad (1-4)$$

其中第一项表示纬向平均经向环流输送，第二项表示涡旋输送。沿纬圈的Fourier分析能揭示主要尺度的涡旋输送，例如，我们可以研究长波(波数 $n=1-3$)、中波($n=4-7$)和短波($n>8$)的贡献。

把时间和纬向平均算子结合起来，我们可以把 A 的向北输送表示为

$$[\overline{VA}] = [\overline{V}][\overline{A}] + [\overline{V^*A^*}] + [\overline{V'A'}] \quad (1-5)$$

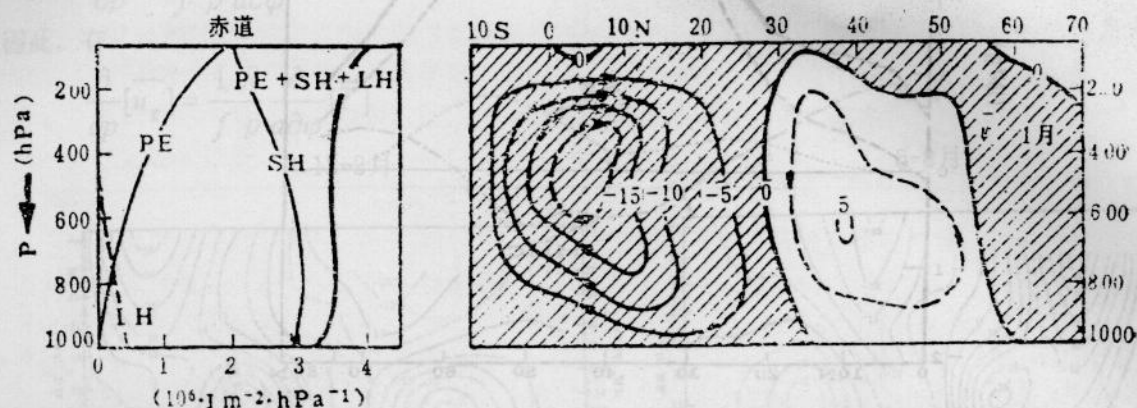


图1.2 能量的径向传输(通过径向环流)示意图

(右图的质量流线单位为 $10^{10} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。左图中，PE为位能；SH为感热；LH为潜热)

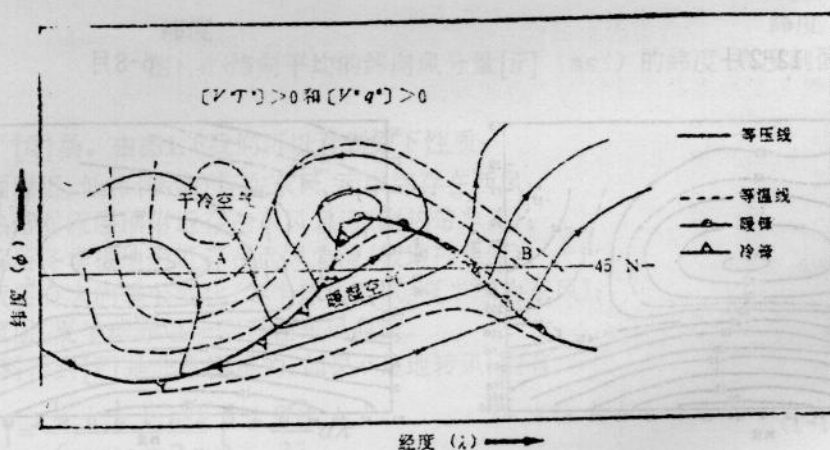


图1.3 通过水平涡旋环流能量输送示意图

其中右端三项分别表示平均经向环流输送(纬向对称翻腾, 参见图1.7)、恒定涡旋输送和瞬变涡旋输送, 最后一项包括瞬变平均环流(通常贡献最小)。

所有三个过程在维持大气环流中都是重要的, 通常人们发现纬向对称翻腾在热带是水平和垂直输送的主要机制(Hadley环流输送), 而中、高纬地区瞬变和恒定涡旋输送是主要的机制。图1.2和1.3说明了这些不同的模式是怎样引起大气中的能量向北输送的。图1.2表示由于高层支比低层支携带更多的能量, 因此, Hadley环流向北输送能量。另一方面, 图1.3表明由于向极地运动的空气是相对地暖和湿, 而向赤道运动的空气相对冷和干, 在中纬涡旋向极地输送热量(感热和潜热)。图1.4给出了大气中向极地总的能量输送以及它的平均和涡旋分量。