

中期数值天气预报的现状和展望*

吴 国 雄

(中国科学院大气物理研究所)



自第二次世界大战结束以后,随着计算技术、探测手段、数学及物理学科的发展,天气预报有了显著的进步。理论和实践的差距在缩小,天气和动力结合日趋紧密,定性、主观方法逐渐为定量、客观方法所代替,数值天气预报在世界范围内取得了极大的成就。此期间,两次重大的跃进举世瞩目。第一次是恰尼·牛曼和弗约托夫特在1950年成功地用计算机首次做出了短期数值预报。第二次跃进发生在七十年代。首先都田菊郎于1972年用GFDL的模式成功地进行了两周数值预报的试验;接着欧洲中期天气预报中心(ECMWF)于1979年投入业务,世界范围的天气监视、资料同化、数值预报和气象服务进入了一个新阶段。为了跟上日新月异的世界经济发展的步伐,气象界也在部署新的进军,ECMWF在1984年底制订出了新的10年规划。本文简短地回顾中期数值预报业务化的实现(第一部分),然后在介绍ECMWF 10年规划的基础上,对中期数值天气预报的现状(第2部分)和未来发展(第三部分)作一简介。

一、中期数值天气预报业务的实现

短期数值预报经过近20年实践,到七十年代已日臻完善。以美国国家气象中心(NMC)为例,其数值预报技巧得分自1958年引进正压涡度方程后稳步上升(见图1)。1962年引入准地转斜压模式,1966年6月改用6层原始方程模式。每一次模式更新都使得技巧得分提高。到1970年,各国在业务中使用的过滤模式多数已被原始方程模式所代

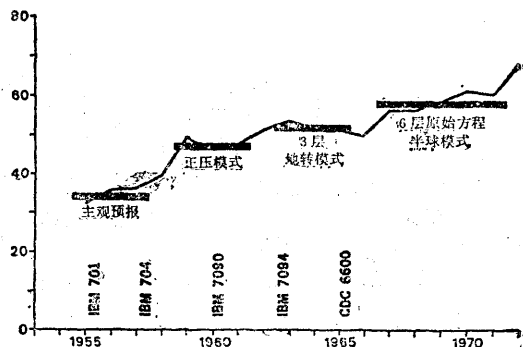


图1 华盛顿 NMC 北半球 500 hPa 36小时预报年平均技巧得分

图中水平线段标明模式没有变更期间的平均得分,得分为零指没有天气价值,为100指完善预报

替。在此同时,关于水平分辨率作用方面的研究也取得了一定的成果。

1969年,斯马哥林斯基在大气环流试验中首先发现,模式对热带外气旋的新生具有预报能力,甚至也能较好地模拟第二代的扰动。数值预报在短期业务中的成功,以及大气环流数值模拟在长时间积分中的进展,促进了中期数值预报的研究。1972年都田菊郎用GFDL的9层半球模式,首先作出了两周的中期预报;欧洲气象界在1973年决定建立ECMWF。1976年,该中心开始筹建,1979年8月,ECMWF正式投入业务,诞生了世界第一个中期数值天气预报业务中心。

二、中期数值天气预报的现状

ECMWF开始投入业务时,使用的模式

* 本文根据作者1985年9月在全国热带动力气象会议上的报告整理。

是 N_{48} 格点模式。水平格距为 1.875 纬距 $\times$ 1.875 经距；垂直方向分 15 层；时间步长 15 分钟；时间积分用蛙跃格式和半隐式格式。从 1983 年 4 月 21 日起，该模式被 T_{63} 谱模式所代替；在纬圈方向共有 63 个波；垂直方向分 16 层。用该模式进行 10 天预报，在 Cray1-A 计算机上用了 3 小时 50 分，在 Crayx-MP 上只花约 2 个小时。1985 年 5 月启用了新的 T_{106} 模式。原用的平均地形方案（青藏高原最高约 5km）在 1983 年为包络地形方案（青藏高原最高约 7km）所取代。除了动力方面的改进外，模式的物理方面也不断改善，如 1984 年引入辐射日变化，1985 年引入浅薄对流参数化等。动力和物理两方面的逐渐改进，使 ECMWF 模式的可预报性逐渐延长。如取（预报 - 气候）及（实况 - 气候）两个距平场的相关作为预报质量的量度（它将随预报时段的增加从 100% 开始减小）。一般取这一距平相关降低到 60% 时的天数，作为模式可预报性的度量。图 2 表明，模式的可预报性夏季小于冬季。但不管

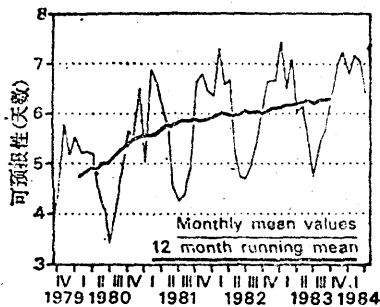


图 2 ECMWF 北半球预报的技巧用 1000hPa 到 200hPa 的高度场及 850hPa 到 200hPa 的温度场，算出逐日的距平相关和标准差，再求月平均而得，粗线表示 12 个月的滑动平均，纵坐标为可预报性（天数），横坐标为时间（季·年）

是冬季还是夏季，ECMWF 的预报自 1979 年以来均有明显改善。如果单独计算 500hPa 高度场的距平相关，则其第一个冬天 1979—1980 年达 60% 的时间已多于 5 天，到 1983—1984 年冬增至 6.5 天（见图 3）。目前有业务预报的时间，较之都田菊郎 1972 年的试验，已延长了 3 天。这一进展与误差在模式

中不稳定增长减慢有关。以 1000hPa 高度预报为例，在前三天的预报中，ECMWF 模式

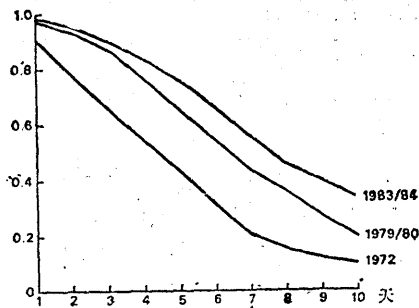


图 3 ECMWF 的业务预报在 1983—1984 及 1979—1980 年冬季的距平相关得分，以及都田菊郎 1972 年发表的 12 个元月例子的相应得分纵坐标为 500hPa 高度的距平相关，横坐标为预报天数

的均方根（RMS）误差就已经比世界其它中心的为小（见图 4）。

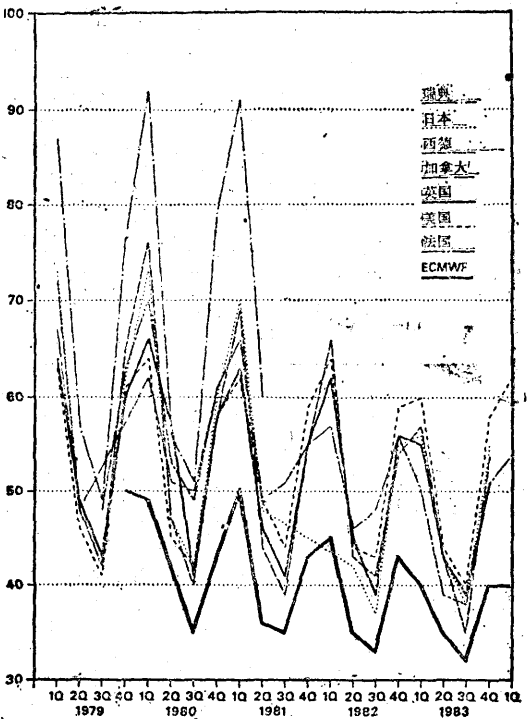


图 4 1979—1983 年各季节世界主要数值预报中心 1000hPa 高度场 3 天预报的 RMS 误差纵坐标为误差，横坐标为时间（四季）

中期数值预报的上述改善主要是由于模式的改进。但观测资料的增多及其使用的改善也起了重要作用。后者包括较好的客观分析方法,更精确的初始化过程,以及更准确更协调地把预报模式用于资料的同化。

除了形势预报的改善外,要素预报的服务也有所改善。目前 ECMWF 已经能为各地提供如图 5 所示的,包括边界层的风、温度及云量和降水等要素的 10 天预报。

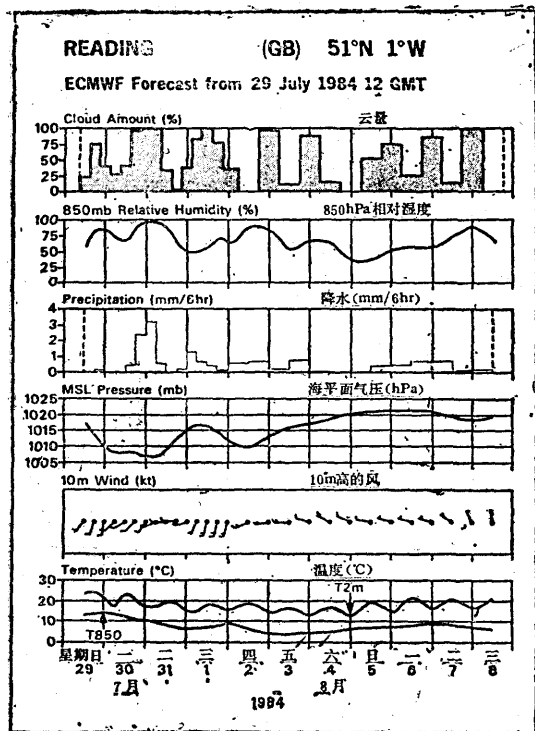


图 5 ECMWF 制作的测站要素 10 天预报一例

测站要素值直接由最邻近的四个模式格点值不经任何统计订正插出,图中给出的参数值在前 3 天半由每 6 小时一次的预报值给出,以后由每 12 小时一次的预报值给出

与预报和服务的改善相适应,该中心在资料的收集、加工、同化、发放,以及产品加工和资料库建设方面也迅速发展,并通过世界气象组织的全球通信系统(GTS)与世界各地联系。概言之,目前中期数值天气预报业务在形势预报,要素服务,资料加工,情报通信等方面已发展成一个较完整的综合体,预报质量已达到较高水平。

三、中期数值天气预报的未来发展

计划的制订应以对发展的预测为基础,涉及对需要、可能、问题和措施的综合分析。中期预报在海运、交通、农业、能耗和工业上的重要性是人们熟知的。举例说,巴黎每天 1°C 的温差导致天然气消耗差达 130万m^3 ,因此,合适的天然气贮存量需要正确的中期气温预报。据 ECMWF 统计,仅从成员国能直接估计的经济部门计算,中期预报每年的经济效益就在 1 亿英镑以上。现代工农业对中期预报的需求是不容置疑的。下面将仅从可能性和必要措施的角度,以 ECMWF 为例去综述中期天气预报业务的未来发展。

1. 预报系统的发展

(1) 中期确定性预报的发展——动力可预报性问题

既然 ECMWF 前 10 年已把有用的确定性预报提高到 6.5 天,进一步提高其预报时效是否可行? 如果可行,下一个目标又是什么? 这些问题涉及动力气象的进展。过去 10—20 年,在中期预报取得突破的同时,另一个重要成就是:通过试验和理论研究,人们比较深入地认识了限制数值预报进一步发展的因子。首先,气象学家们认识到,要在相当长的时段中报出瞬变的天气过程是不行的。原因在于大气(包括真实大气和模式大气)对于小振幅的扰动来说是不稳定的:两个或者若干个稍有不同的大气状态,在相同的物理定律制约下,能随时间演变为相当不同的状态。既然气象观测永远不能给出整个大气的精确状态,我们就无法从许许多多的几乎是一致的状态中确定一个目前大气的“真实状态”。于是经过足够长的时段后,在许许多多的相当不同的预报场中,我们便没法确定哪一个会真正出现。如果把目前的业务预报技巧,认为是瞬变天气流型可预报性的下界的话,则上述大气的动力不稳定性对这种可预报性施加了一个上界。一个中期预报模式如果是“完美”的,它的可预报性

就应接近这个上界。

洛伦兹 (1982) 利用 ECMWF 1980—1981 年冬 100 个 10 天预报的资料, 研究了这种可预报性。图 6 给出了 500hPa 高度的 RMS 误差 E 的增长率 $\frac{dE}{dt}$ 随 E 分布的程度。对于一个“完美”的模式, 其误差的增长率与 E 的关系呈二次抛物线分布, 如图中实线所示; 且当 E 相当大时, $\frac{dE}{dt}$ 应很快趋向零。但目前的 RMS 误差增长 (图中 X 点所示) 在 E 很大时仍远大于上述分布。这就是说, 如果

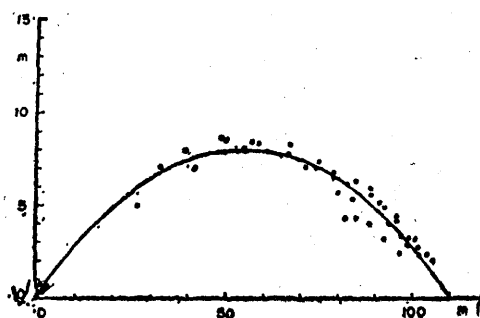


图 6 用 ECMWF 1980—1981 冬 500hPa 预报资料所作的误差增长率 $\frac{dE}{dt}$

(纵坐标为单位时间增长 RMS 数) 随 RMS 误差 E (横坐标) 的分布。

图中圆点示模式中误差中误差不断增长的变化状况, 由二次曲线拟合, X 示 ECMWF 模式预报误差变化的状况

能使目前 ECMWF 模式的预报误差增长率, 在误差很大时减少约 1/3, 就能接近“完美”。换言之, 尽管受动力不稳定的约束, 使 ECMWF 的预报进一步延伸还是可能的。图 7 进一步给出了目前模式和理想模式中 RMS 误差 E 随预报时间增长的情况。它表明, 通过改善模式的动力和物理部分, 采用理想模式, 将目前的有用预报延长 3—4 天是可能的。如果能进一步使现有起始误差减半, 则可预报性将可再延长 2 天左右。这就是说, 把有用的中期预报在未来延长到 12 天左右是可能的。

模式的改善涉及动力和物理两部分。它

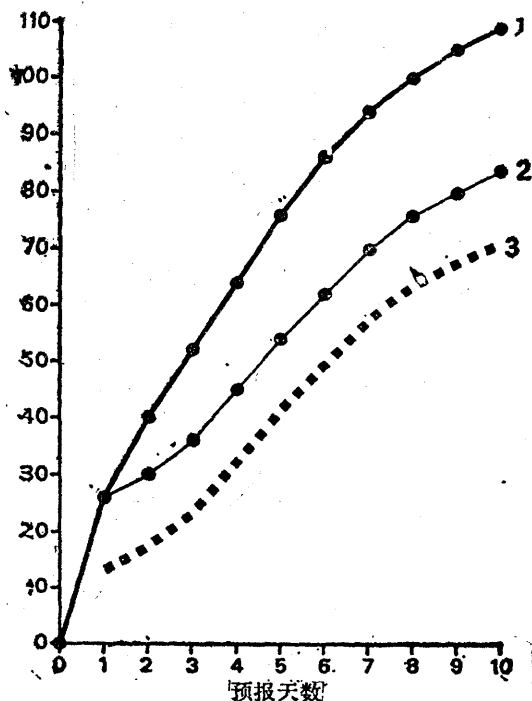


图 7 500hPa 高度的 RMS 误差随预报时间增长的情况

曲线 1 代表 ECMWF 模式的预报, 曲线 2 代表使用“理想模式”后误差的增长状况, 曲线 3 则代表使目前观测误差减半并使用“理想模式”后误差的增长状况

们均与模式的分辨率有关。水平分辨率对模式有用预报天数的影响可由图 8 看出。未来的 10 年, 计算设备预计将以与过去相同的速率增长。而由于技术的进步, 计算经费的增长则不会很多。这为使用高分辨全球预报模式创造了条件。预计到九十年代中, 用于中

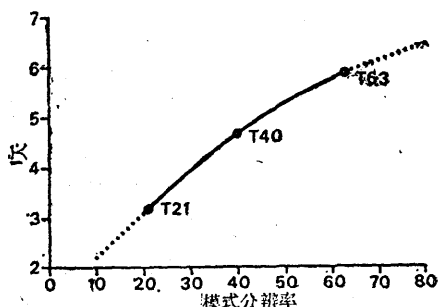


图 8 在谱模式中的有用预报的天数 (纵坐标) 与水平分辨率 (横坐标, 单位: 纬向波数) 的关系
用 1000hPa 资料算得

期天气预报的模式水平格距可达 50km 左右。ECMWF 曾用与此相似的分辨率(0.47 经/纬度格距), 由有限区域模式进行热亚那气旋(α -尺度)生成的 48 小时预报试验(见图 9), 直径只有 200km 的低于 1005hPa 的气旋中心仍预报得十分逼真。看来, 通过使用高分辨率、改进动力和物理过程去改善模式, 从而使可预报性延伸 3—4 天是有可能的。

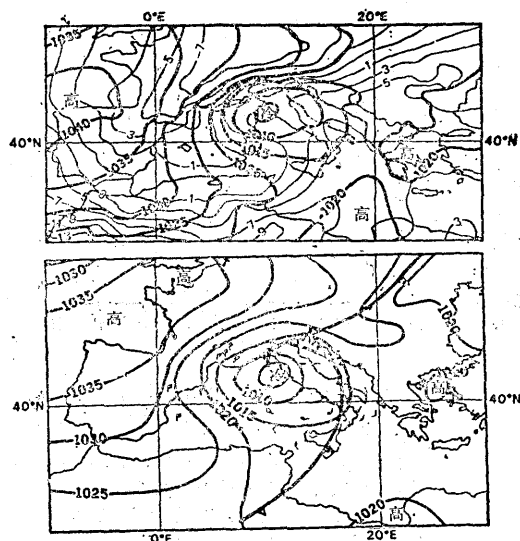


图 9 用 ECMWF 的有限区域高分辨模式 ($\alpha=0.47^\circ$) 预报 48 小时热亚那气旋生成的一例

上图为海面气压和 850hPa 温度预报, 下图为海平面气压实况

另一方面, 通过改进世界天气监视网和卫星观测, 发展同化系统, 使模式的起始误差在未来减半也有可能。因此, 在未来 10 年内, 把中期有用的确定性预报延伸到 12 天是可能的。这就是 ECMWF 未来 10 年的战略目标。

(2) 延伸预报(月预报)的发展——边界强迫可预报性

大气的可预报性除了受动力不稳定性影响外, 还受边界强迫作用的影响。后者一般指边界强迫可预报性, 它是由于缓慢变化的强迫源, 如海表面温度、海冰及雪盖等, 以月的时间尺度影响着大气环流所致。研究指出, 由于大尺度的运动在时间谱和空间谱中均占支配地位, 还由于在许多时间尺度的

运动中存在着确定的特征距平流型(如阻塞形势、半永久性活动中心等), 即使超过动力可预报性的上限(2 周左右), 仍有可能对行星尺度作出时间平均预报。都田菊郎等(1983)在模拟 1977 年冬季北美的阻塞形势时, 比较成功地作出了北美偏冷的“月预报”(见图 10)即为一例。预报试验及中期预报经验还指出, 这种可预报性对起始场流型的依赖性较大。

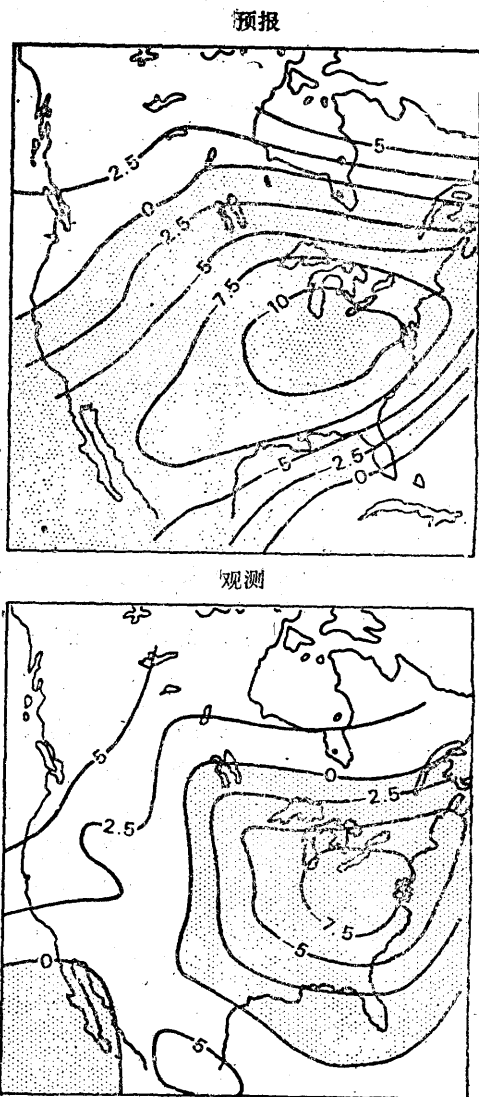


图 10 都田菊郎等(1983)作出的 1977 年 1 月北美 850hPa 10—30 天平均气温($^\circ\text{C}$)距平分布预报(上图)及实况(下图)

要利用现有的中期数值预报模式作长期预报,必须解决模式的气候漂移问题,即模式气候对真实气候的偏离问题。气象学家们正在研究若干措施去克服这种模式的系统误差。ECMWF 已经用其模式进行了月预报的若干试验,初步结果是令人鼓舞的。因此,未来 10 年在进一步改善和延伸中期预报的同时,使月趋势数值预报业务化也将是气象界努力的目标。

(3) 海浪预报

航运、捕鱼、近海作业等需要准确的中期天气预报。目前 ECMWF 的日常业务直接从模式得到或从模式参数导出表面或近表面的要素进行海上服务,如 10m 高处的风,2m 高处的气温等。但还不能提供海况预报。目前,汉堡麦克斯-普朗克气象研究所已研究出新一代的海浪预报模式,英国气象局则已用自己发展的海浪模式对北海油田提供短期海况的预报和服务。未来 5—10 年,利用中期天气预报的产品制作全球中期海浪预报将是可能的。以这种全球海浪模式的结果作为边界值,有限海域的高分辨的模式也将会逐步实现。

2. 业务系统对资料的要求

中期数值天气预报的全面发展对计算机系统提出了更高的要求,即使目前的亿次机 Crayx-MP 也难以胜任。ECMWF 已针对此计划在八十年代末采用比 Cray 机快 10—20 倍的计算机。这里简要介绍中期预报业务未来的发展对观测资料的要求。

(1) 所需资料

随着模式分辨率不断加细,对观测资料提出了更高的要求。为避免过分的插值,减少起始误差,观测资料必须覆盖全球;水平分辨率应与模式的相近,即 50—100km;垂直分辨率在 2km 以下为 500m,2km 至 15km 为 1km,15km 以上为 3km。除自由大气的要素外,还需要地面气压、地面状况(如土壤水分)、积雪和海冰以及海面温度的资料。为发展和改善模式,还需要有短波和长波辐

射、反射率、云、表面温度和土壤温度等参数。如果资料同化周期能从 6 小时减为 3 小时,起始误差也会明显下降,尤其对高分辨模式更是如此。根据上述精度要求估计,全球中心到 1990 年需要的资料量将接近目前资料量的两倍。

(2) 卫星资料加工和资料同化系统

要为模式提供全球范围的、分辨率与模式相当(50—100km)的资料,靠目前的常规地面和探空观测网,远远不能满足需要。因此除通过世界天气监视网改善资料质量,以及通过实施全球气候研究规划增加海面资料覆盖外,卫星探测资料将构成未来高分辨模式初始资料的主体,为此应发展对全球卫星资料的准实时加工。为更有效地利用全球观测资料,必须发展连续资料同化系统。ECMWF 计划在 1987 年引入 3 小时同化系统。由于资料量加大及资料形式变化,整个同化系统,包括质量控制和尔后的资料存档,也必须相应变化。同样地,资料发送和通信也必须变化。为保障 10 年规划的实施,ECMWF 对此已作出部署。

总之,中期数值预报的未来发展必将依赖于全球观测系统的全面改进和计算技术的继续发展。然而,由于有气象和大气科学的蓬勃发展,有全球规模的协调的气象合作,更由于有气象科学工作者的创造性和努力,可以预期,这一未来发展将会富有成果。10 年后的全球中期数值天气预报又将是一派崭新景象。

《天文气象学术讨论会文集》出版

《文集》反映了国内近 10 年来在天文气象这一边缘领域的主要研究成果,是国内第一本较全面的天文气象研究专集。内容侧重探讨天文因子对灾害性天气和气候异常的影响,分为两个部分:第一部分为太阳与天气气候,包括太阳黑子、耀斑爆发、高空大气电及臭氧与天气气候变化关系的新近研究成果;第二部分涉及天体引潮力、日月行星对地球的相对运动、节气、日月食等与天气气候变化的关系等。

该《文集》将由气象出版社于 1986 年 8 月出版,可供气象、天文、水文、海洋、地理、农业、渔业、林牧业等部门的有关科技人员及有关大专院校的师生阅读参考。

(任振球)