

近代气象学的几个问题

罗斯貝 著

农业出版社



近代飞艇学的几个问题

李 德 著

科学出版社

近代气象学的几个問題

罗斯貝 著

朱和周 譯
盧志强

农业出版社

內 容 提 要

这篇文章原发表在 1956 年“瑞典自然科学研究委员会年鉴”上, 1959 年譯成英文, 收載在罗斯貝紀念文集“运动中的大气与海洋”一书中, 本书是根据英文譯出的。

文章較全面地概括了近代气象学中几个主要問題的研究成果和今后发展方向, 分导言、行星范围的平衡和环流問題、大气环流、天气預报、大气中物质的分布、控制大气过程的試驗等六节, 可供气象科学研究人員和大专院校师生参考。

近代气象学的几个問題

[英] 罗 斯 貝 著

朱和周 卢志强譯

农 业 出 版 社 出 版

北京老鐘局一号

(北京市书刊出版业营业許可証出字第 106 号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

农业出版社印刷厂印刷裝訂

統一书号 13144.143

1963 年 5 月北京制型

开本 850×1168 毫米

1963 年 6 月初版

三十二分之一

1964 年 3 月北京第二次印刷

字数 52 千字

印数 2,401—4,200 册

印张 二又八分之一 插頁一

定价 [科六] 三角三分

导 言

这篇阐述近代气象学研究中的问题的文章，主要是讨论以物理定律为基础而定量分析大气的状态和运动的这个早就提出的气象学问题。此外，还要探讨近代出现的有关大气作为一些非溶性矿物质、可溶性凝结核和工业污染物的传播者的问题，这些问题对于了解大气在某些地质过程中所起的作用和大气作为地面上生物过程的孕育环境一般是重要的。过去，一直认为这些问题只是气象学的边缘问题，这多少是由于上述那些被风传播的物质反过来对于大气环流的贡献一般是不重要的缘故。但是，近年来越来越觉得预报出大气中大范围扩散过程的效应是应用气象学的一个重要任务。并且，有系统地研究各类被风传播的质点的分布，又能提供我们有关单个空气质点的轨迹，因而也是有关大气动力学的宝贵资料。这些资料单靠分析现有的观测纪录是无法得到的。因此，最近更多地注意到大气的轨迹和扩散问题。

这个气象学上早就提出的任务是否得到解决，其主要标志是看我们能否根据一些理论原则来客观地计算大气未来的状态和运动；换言之，即是否能做出天气的数值预报。总之，这意味着要设法回答这样的问题：“在未来某一地点、某一瞬间的风速、风向、气压等要素的值如何？”另一方面，气象工作者已越来越注意的扩散问题也可以归结为下面的预报问题：“一个已知的空气质点在未来某一瞬间位置如何？”要达到能够应用基本流体力学方程来解决这两类问题的程度，扩散问题则要加一个时间积分，因此对于所依据的理论和观测资料，都要求更高度的准确性。

不用說，這篇文章在立論方面難免帶有片面性和主觀成分。其所以不全面，不僅是限于篇幅，並且對一個氣象學者來說，事實上也不可能詳細了解現代氣象學研究的全部內容。其中許多有重要理論和實踐意義的專門的或局部的問題，在這篇文章里都沒有涉及，而只限于帶有全球性的較大的問題。

文章的头一部分簡單談幾個有關大氣的整體和大氣與海洋的相互關係的問題。隨着討論大氣環流的研究以及數值預報的現有水平。在談預報時還提到大氣軌跡的某些問題，接着討論大氣化學中的某些環流和擴散問題。最後對人工控制某些大氣過程的可能性作了扼要的評述。文章中到處強調了地球物理學的各個分支的互相依賴性以及許多問題的相似性，其中特別是氣象學、海洋學、水文學和地球化學的相互關係問題。負責培養地球物理學工作者和制訂地球物理學研究計劃的人員終究必須考慮到這些部門間的密切相關性。

作者在編寫這篇文章的過程中，“國際氣象研究所”許多同事提出了許多寶貴的批評和建議，其中值得特別提出的是所內負責數值預報多年的波林博士。除數值預報外，波林博士對所內其他研究活動也有貢獻。

目 录

导言

行星范围的平衡和环流問題	1
一、輻射平衡和热量存儲	1
二、二氧化碳及其循环	7
三、氡和水文循环	11
大气环流	14
天气預报	28
大气中物质的分布	41
一、空气的軌跡	41
二、海盐的分布和环流	43
三、硫和氨的环流	46
四、海面上的物质交换	52
控制大气过程的試驗	54

行星范围的平衡和环流問題

一、輻射平衡和热量存儲

自从这个世紀初气象学初步定型后的几十年內，为研究每日大气状态和运动的变化的气象台站网日益加密，現在已經能得到每日两次北半球較大地区对流层及平流层下部空气运动的相当准确的情况。同时，对于大气动力学和大气物理学的了解也日益加深。無論許多以往认为已十分确定的基本假設，甚至在气象教科书中也用不着証明的，目前也发生动摇了。大气热量平衡就是一个很好的例子。

太阳輻射垂直达到大气頂部边界面上每平方厘米的能量大約是每分钟 1.95 卡。这个“太阳常数”值当然不是十分准确的，因为它是根据大气内部的測定值向外推算出来的。但是对于后面提到的一种計算結果，这种誤差可以认为是不重要的。由于地球表面积比其剖面大四倍，所以只能有每分钟每平方厘米 0.49 卡的能量可以利用来維持大气和海洋的环流。一般假設这个能量中的 30—40% 要被云頂表面、积雪区以短波形式反射回宇宙空間，海洋表面和大气(瑞利散射)也反射很少一部分。准确的总反射量还未求出来。淨余的每分钟每平方厘米 0.3 卡的能量就是推动大气(和海洋)运动的有效太阳輻射。一般是毫无疑問地认为，整个地球与大气是与其外界达成輻射平衡的，因此就应有同样多的能量(0.3 卡/平方厘米/分)从地面、从云頂、尤其重要的是从大气中的水汽以长波(紅內綫)形式輻射回到宇宙空間。現在还未能确定出維持这种

輻射平衡可以准确到甚么程度,据下面的計算可以看出,这种程度与所取時間間隔长短关系很大。

辛浦生(G. G. Simpson)1920年底发表了三篇非常重要的論文,討論了大气的热量平衡,并計算出向外长波輻射的地理分布和年变化。他发现向外輻射量在時間和空間分布上都是很均匀的,并且就計算所能达到的准确程度而言,他发现一年中任何一个月,整个地球范围向外輻射总量与向內的有效太阳輻射总量总是平衡的。辛浦生并没有考虑固体地球和海洋內部的总的热存儲量,这种量气象学者在研究輻射平衡时向来是不予以考虑的。从計算出的向內輻射和向外輻射量能够这样一致看来,就全球范围說,热存儲量变化即使在短至一年或几个月的一段时间內,也有可能略去不計。从辛浦生求出的向外輻射的時間和空間分布都很均匀这一点看来,上述两种輻射能这样一致就值得奇怪了。因为向外輻射既这样均匀,它們就显然无法作局地調整以便与時間空間变化很大的向內有效太阳輻射相适应。

辛浦生的計算結果可以作如下的定性的解釋。大气內的长波輻射的强度主要是由水汽和溫度的垂直分布来确定的。对于第一級近似,二氧化碳吸收和发射所产生的小偏差可以略去不計。如果不計水汽吸收光譜中8.5至11微米这一段(辛浦生认为无云大气对这一段光綫是完全透明的),水汽大气是相当不透明的,因此可以假定大部分射回到宇宙空間的輻射是由对流层的中层或者上层以及云顶表面輻射出来。由于大气中不断地进行对流混合,并且水汽浓度的最大极限决定于每一溫度的饱和水汽压,所以水汽的垂直分布与溫度的垂直分布有密切的关系;辛浦生实际計算时是应用一个經驗公式单一地根据溫度来确定相对湿度。云顶溫度假定到处都是相等的。大气吸收所产生的向外輻射既然几乎全部在溫度已知的水汽大气的上部发射出去,那么这个高度与地面距离的大小(换言之与地面溫度高低)就并不重要。因此,向外輻射

通量几乎可以单一地确定。

继辛浦生之后,许多人詳細研究水汽的选择吸收光譜,并发明了用一些图解法根据实测到的温度和湿度分布,更可靠地計算大气长波輻射的通量,在这方面的研究中多年来最著名的 是埃爾薩索(W. Elsasser)。

这些图解法的基本优点是不需用辛浦生計算时所依据的水汽与温度分布的解析关系。上面已經說过这种关系妨碍了向外輻射对向內太阳輻射作局地調整。但是我們要記住水汽含量和温度的关系是一个經驗的和統計上的事实,所以 即使在用垂直层結的測值作图解法計算中这种事实也会反映出来。因此,图解法虽較細致,但是否能得出与辛浦生所得到的向外輻射的均匀性和不适应性有大的根本差別,还是值得怀疑的。几年前,豪頓(H. G. Houghton)根据云的分布和光的反射的最新資料,并将埃爾薩索图解法应用于現有大量的探空站的高空資料,公布了新的年热量(輻射)平衡值。其中向外輻射和向內輻射的值都大大超过辛浦生的計算結果,但仍未解决两类輻射的适应問題。

在后冰河时期(post-glacial)气候变迁的研究中,曾經认为最重要的是了解地球与外界空間的輻射交換如何調整来适应太阳常数的可能变化。辛浦生的解答是,既然向外輻射变化不大,那么这种适应可能是通过总云量的变化来完成的,其过程为:向內輻射量增加,由于海洋上蒸发作用加快,从而使云量增加,这又增加向內輻射的反射。但从全球云量从冬至夏变化不大看来,这个結論首先就值得惊奇的。辛浦生为了支持自己的假說,又对金星、地球和火星的輻射平衡作了非常有趣的比較,以10来表示总云量,金星云量是 10/10,地球是 5/10,火星是 0/10。由此产生三种星球对于太阳向內輻射的反射能力(反照率)的差別,就足以抵偿掉各星球因与太阳平均距离不同而产生的太阳向內輻射量的差別。

現在我們对于到达大气上部边界的太阳輻射总量的变化还知

道得十分粗浅，这个变化量大概是总能量百分之一至百分之几。变化最大的大概是在向内辐射的紫外线部分，这种辐射几乎全部被上层的大气所吸收，因此并不能直接影响低层大气及其环流。因为上层大气的密度很小，所吸收的太阳辐射量的变化，会引起局地温度强烈变化。曾经有不少人企图建立一些可以使高层温度变化逐渐影响到对流层环流的机制，但未获得任何结果。不过，从平流层低层(15—35公里)的大气垂直稳定性很大看来，这些较高的大气的温度和结构的变化很可能对对流层不会有任何显著的影响。但这只是作者个人的见解，并不是所有气象学者都同意这一看法的。

前面已经说过辛浦生的工作并没有把热存储量的长年变化考虑在内。鲍尔(F. Bauer)和斐立浦斯(H. Phillips)分别在1934年和1935年初次考虑了地壳中和海洋中热存储量的年变化，沿辛浦生的路线重新计算热量平衡，并应用了较为准确的参数值。他们假定局地的热存储量有一个年周期的变化，但在一年内地净余存储量等于0。因地壳的导热率十分小，它的热存储量变化也就很小，这一点可以从与外界隔绝的沙漠区的温度气候与太阳变化有密切关系的事实看出来。大气的储热能力也是很有限的，如果一年中大气只要能存储有效太阳辐射总量的1%(即0.003卡/平方厘米/分)不散失到宇宙空间去，就能使大气平均温度增加 6.3°C ，不过，因为大气中来自海洋的水汽量同时有所增加，这使所能增加的温度值减少一半。

现在还没有弄清楚大气中总的可感热量和潜热量变化的数值和特性。目前虽已有一个较完善的国际气象站网，但还没有一个负责的和有足够设备的国际机构来经常进行这方面大量的统计计算。

在海洋的表面水层中，由于经常受到风的影响，引起混合而形成垂直均匀的水层，这个水层的中间层深度约50—100米。如果

把这一水层的热容量考虑进去,那么存储了1%的有效向内太阳辐射量只能使整个储热层(大气加上表面的均匀水层)的平均温度增加十分之几度。

不难证明,在计算局地辐射平衡时应该把乱流表面层的热存储量考虑进去。这可举冷暖水团平流影响不大的百慕大群岛为例。那里暖季向内的多余有效太阳辐射量,完全可以说明那里表面水层内随时间增加的热存储量,这些热存储量是在夏至后三个月达最大值。同时可以在辛浦生的表中和鲍尔与斐立浦斯的计算中看到,那个地区的向外辐射,实际上是不随季节变化的。

南半球海洋表面水层的热存储量的减少,正是北半球表面水层热存储量的增加的时候,因此对于地球上的总热量平衡,这表面层似乎是并不重要的,这一点就与辛浦生计算的结果相合。不过,若考虑到两个半球间水陆分布的差异,上述平衡就不易解释了。

如果在计算总热量平衡的长期变化时,考虑到海洋较深层的环流,那么海洋作为长期热源的作用便大大不一样。根据初步计算,在一个厚1,000米的水层中就算存储了1%的向内热辐射总量,每年温度增加也不会大于 0.015°C ;更深一些,温度增加的比例就更小。——这些较深的水层因受到接近海面的一层稳定层结的较暖水团所阻隔,不能和大气接触,并且不能通过增加蒸发和云量来直接恢复辐射平衡。上面所举的数值必须加以校正,因为地球表面有一部分是大陆和陆棚(continental shelves),其数值须增加50%,不过对于这样粗略的估计,作这种校正是不重要的。

深水是来源于南极边缘,特别是沿大西洋一侧,而在较冷季节,则甚至可在北大西洋近格陵兰的局部区域产生。此外,整个北大西洋上的盛行风系也迫使北大西洋北部的水输入到深海中,这些风系通常使表面海水往北输送。这样形成的深水团通过南极绕极洋流逐渐扩展到其他海洋中,最后则到达太平洋,这里可以找到“最老”的水团。整个循环可能是通过表面较暖水层与停滞的深水

层的緩慢的机械混合作用来完成的,这样,深水又回到表面来。由于机械混合作用的强度随着表面水层与深水的温差增大(亦即垂直稳定性加强)而减弱,所以上述温盐循环的强度可能会有强烈而且相当不規則的緩慢变动。在正常情况下参加这种循环的水团的总容积还不大清楚,不过估計量級可能在10—100百万立方米/秒之間,对于前者,整个海洋环流周期是4,000年,对于后者,是400年。400年左右的周期与对深海的瞬时“年齡測定”中用 C^{14} 分析所得的結果以及对海洋較深层氧消耗量的估計所得的結果相当一致。

根据上述粗略估計,可能归結为下面两点提示:

1. 整个地球肯定地与外界空間維持輻射平衡(即使考虑的周期长达数十年)的假設是不能毫无保留地接受的。

2. 在海洋中可能存儲而且暂时与外界隔絕的一些热量差額,經過数十年或数百年后,这些热量又对大气的热量和水汽交換产生影响。

如果后一假設是正确的,那么为时数百年的后冰河期气候变迁問題就有了新的研究內容。不过应当指出,如果这些海洋內部存儲的热量差額是逐渐地分布到較大的水团中去,那么当它們传到海面时,造成的温度振幅就很小。这样小的温度变化如何对大气产生显著影响,至今还是一个未解决的問題。比較可能的是这些变化的变率并不是常数,这使得表面水层和深水間的温度差随時間有相当大的变化。

如上所述,气象学者和海洋学者在研究海洋和大气的全球性环流系統及其变动的时候,測量或者可靠地估計出地球与外界空間的热量交換,就成了一个主要的問題。我們关于透过大气的长波輻射的知識还很不成熟,自然就无法可靠地用数值方法来計算这些通量的强度。况且海洋学尚未发展成一門綜合性的科学,对于大部分海洋內部,探索得还很少,因此也无法計算热存儲量的长

期变化。在国际地球物理年期间将对大西洋某些部分进行详细的测量,以便找出热存储量变化的规律,早在1920年,“大气现象探险队”已对这个大洋进行过调查。

在国际地球物理年期间,还准备放出一些卫星来测量地球与宇宙空间总的热量交换,观测需用的仪器已经进行了许多探索性的工作,这无疑是气象学和海洋学的一件大事。为了确定出热量交换的情况,除了需要按原订计划同时测量向内辐射量(太阳常数)和地球反照率(反射率)外,还需要测量向外的长波辐射量。既然重点在于测量出向内辐射与向外辐射间的微小差别,在技术上一定会碰到不少困难,不过热量交换既是个很重要的基本问题,预计今后必然会进行大量的工作,来解决测量的问题的^①。

二、二氧化碳及其循环

海洋表面与海洋深层间的环流,特别是这些环流的周期,对于研究另一个全球性的气象问题是非常重要的,这个问题对于气候学十分重要,它就是大气中二氧化碳含量增加的问题。大气中二氧化碳含量不断增加,似乎是近50—100年间用煤量稳定增加的结果。同时,在不断地增加着的二氧化碳中,有一部分要被海洋吸收掉,所以海洋(特别是其深层)对于二氧化碳的吸收率,就很大程度地确定着大气中二氧化碳实际增加量的多少。

现今人类正在从事着一件惊人的包括全球范围的唯一的实验工作,他们在数百年间就消耗掉了数百万年中沉积下来的煤矿。这个实验会在气象上产生怎样的后果,现在还不很清楚,不过可以

① 现在已经根据向内辐射与向外辐射完全平衡这个假设推导出一个倍数因子,以校正辛浦生和豪顿计算出来的各个纬度的向外长波辐射量,这个因子对各个纬度是通用的。因计算这种辐射量的方法尚十分不完善,这个校正过程已算是很周密了,校正后仍留下来的偏差已没有重要的物理意义。不过,对于古气候学,这样的偏差量级(1—3%)仍是十分重要的。

断言,随着大气中二氧化碳含量的增加,大气对于地面辐射出的紅內綫的吸收也会增加,这就使得大气的平均温度上升。斯芳底·阿留累烏斯 (Svante Arrhenius) 第一次提出地球上火山爆发所引起的空气中二氧化碳含量的变化,可以用来解释作为地球地质历史标志的气候变化。最近帕拉斯 (G.N. Plass) 計算出,假定其他因素不变,大气中二氧化碳增加一倍,就可使平均气温約增加 3.6°C ;反之,二氧化碳减少一半,則平均气温約减低 3.8°C 。这两个值当然还需作許多修正,主要因为最后决定平均气温的各种复杂过程并不是互不相关和互相累加的现象。例如,二氧化碳使平均气温升高后,必然促使大气中的水汽含量增加,水汽对紅內綫的吸收量也增加,云量也有可能增加。

最近几十年来工业活动范围的扩大,有没有使大气中的二氧化碳大量增加呢?在1940年卡兰达 (G. S. Gallendar) 认为,自从这个世紀以来,大气中二氧化碳可能增加了百分之十左右。他应用了大量观测材料,但由于观测地区十分不均匀(大都集中在工业发达、工业污染物多的中欧地区),所以,所得观测資料的代表性就很不一致。卡兰达认为:他所选择的一些观测資料,是最可靠而具有代表性的,但是看到他所观测的这些資料是十分稀疏的,留下的强烈印象是他的估計不一定是可靠的。最近卡兰达又发表一篇文章,对他以前的及較新的一些資料作了一番評述,最后結論仍是大气中二氧化碳含量在急剧增加着。

卡兰达认为,占空气中二氧化碳总量10%的增加量,約相当于本世紀三十或四十年代中消耗掉的煤所释放出来的二氧化碳量。这等于說,容量約等于大气六十倍的海洋,就只吸收掉很少一部分二氧化碳。要解决这个问题,就必需面临着許多困难問題:如何用最准确的方法,測定大气中二氧化碳的总含量?如何进行測定或估計,以便更多了解海洋表面上二氧化碳交换情况?海洋表面与海洋深层間的交换速度如何?

斯干的拿維亚的一小組科学家在斯干的拿維亚半島、丹麦和芬兰設了十五个站,每月三次抽取空气样本作二氧化碳分析,这样做了大約两年的时间。选择取样站和取样时间时,以尽量避免局地性誤差为原则。发现二氧化碳含量的变化,与盛行气团的来源有密切关系。因此,二氧化碳有可能作为天气分析和預报的要素。时常可以看到在一个发展完全的鋒面两侧,二氧化碳的含量可以相差10%。所以只根据一个有限地区的測定值,是不能可靠地估計出大气中二氧化碳的含量及其长期变化的。

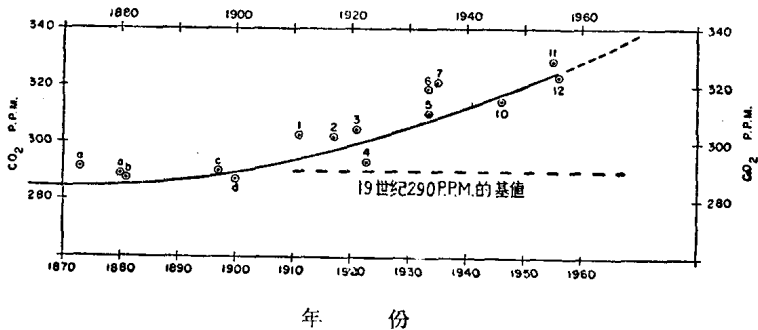


图 1 卡兰达作这幅图来表示从一些严格选择出来的观测序列推出来的近年大气中二氧化碳增长情况。图中上升曲线表示从理論上推算出来的二氧化碳增加值(其中假设海洋及新长出来的植物并不儲藏所增加的二氧化碳)。

为了在某种程度上解决这个困难,可以选择一些天气不活动的地区对地面的二氧化碳进行正规的分析,这些地区必需远离工业区、海洋以及植被很密的地区(植物的同化作用也能对二氧化碳含量产生局地的影响)。为此,应当特别注意在工业还不发达的南半球来测定自由大气中以及沙漠区内的二氧化碳含量。当然这些测量应当同时进行,并且必需积累多年的資料才能确定二氧化碳含量的长期变化。

为了对研究这个重大問題作出贡献,国际地球物理年中将实行一項規模宏大的观测計劃。除了上述斯干的拿維亚的有限的現

測网外,还准备在南北美和南北极設置一个广大的綜合二氧化碳觀測网。此外,并在太平洋及大西洋的一些島屿上、南北美的一些高山站上測量二氧化碳。同时沿一些經綫作正規的航測,以測量自由大气中的二氧化碳含量。尽管这样能收集到大量的資料,但从如此分散的觀測資料中計算大气中二氧化碳含量及其长期变化时,仍然难免遇到許多困难。因此特別注意到一种新的、可能更有前途的方法,它的依据是比較大气中与生物界中的放射性 C^{14} 的含量,苏依士(H. Suess)在1953年初次应用这个方法測定大气中二氧化碳含量的长期变化,后来很多人也采用了这个方法。

在原理上,这种方法所依据的事实是:煤燃烧放出到大气中的二氧化碳是不含放射性碳的,后者的半衰期是5,568年。对上世紀中叶以来的树木年輪中的 C^{14} 含量以及新伐下的树木的最年青的年輪中的 C^{14} 含量作一比較,可以确定出其中經過同化的二氧化碳有多少系来自較早时候大气中“天然的”二氧化碳(在大气中 C^{14} 含量表示放射性碳的产生与衰减間的平衡),有多少是来自自由煤消耗所产生的“非活性的”二氧化碳。

这种方法的很大优点是很可能除掉局地天气变化对大气中二氧化碳含量的影响。但由于不同地区工业消耗的燃料量也不一样(其中以南半球为最小),所以必須分析了从分布得很广的各种地区抽取到的样本,才会得出有关长期变化的确定結論。

必須指出,研究海洋上总的热存儲量的变化或者大气中、生物界中以及海洋中的二氧化碳含量等等这类問題是理論气象学和海洋学中的一类新問題。研究这类問題时,一般是对地理分布不感兴趣的。作为第一級近似,最終可以推出一系列的非綫性的常微分方程組,来表示各类不同的儲热热源之間的相互关系。在特殊条件下,这类热机系統可以維持有限振幅的非綫性的振盪,它們的自我調整的性能,好象是不大健全似的。爱立克逊(E. Eriksson)和威兰达(P. Welander)最近指出上述混合的二氧化碳系統就具