

污染物对全球气候的影响

J. F. B. Mitchell

(英国气象局)

1. 前言

十多年来,人类对气候的影响日益引起关注。这是因为对大气中痕量气体的监测做出的改进和数值气候模式的应用使人们日益清楚地认识到了这些痕量气体会对气候产生影响。第一个广泛使用气候数学模式的气候影响研究计划产生的起因是,超音速飞机很可能会改变平流层臭氧的浓度。美国政府率先制定了一项气候评价计划,很快,法国和英国(英国气象局,1975)也随即效仿。近期的研究主要集中在氟氯碳化物对平流层的影响和二氧化碳对对流层的影响方面。1978年,世界气象组织制定了世界气候研究计划,以协调国际间的研究活动。

当前人们十分关注的问题是二氧化碳的增加会引起全球性增温;其它对辐射有影响的气体可能引起全球温度、降水及风状况的改变。因此导致这样一种推测,上述情况很可能对农业产生不良影响,尤其会使主要农作物生产区变得更加贫瘠。还有人认为,预测出的极地增温足以引起南极西部大面积陆地冰帽的迅速融化。这有可能使得海面升高五米左右,使全世界许多重要城市面临洪水威胁。尽管这种看法有些言过其实,但确有迹象表明,二氧化碳和其它痕量气体的增加所引起的气候变化将是很显著的。

本文重点讨论的是污染物对全球气候的影响,并介绍对二氧化碳增加所造成的影响进行模拟的方法,还将对其它的痕量气体做出探讨,因为二氧化碳研究的诸方面都涉及到其它的对辐射有影响的气体;第二节对污染物改变气候的物理过程做了简要的评述;

第三节讨论了最有可能影响气候的大气成分,并对它们改变全球地面平均温度的潜在可能性做了粗略的估算;第四节对用以估算这些温度变化的简单气候模式的有效性做了评价;第五节给出了气候三维模式的计算结果;最后一节是结论性意见及简短总结。

2. 污染物影响气候的物理过程

地球-大气系统被来自太阳的短波辐射(波长最长为 4×10^{-6} 米左右)加热,又因射向空间的长波辐射而冷却。一个物体放射的辐射强度随温度增加,从长期情况来看,地球与大气的温度是这样的:大气顶部放出的长波辐射正好与来自太阳的净入射辐射保持平衡。在没有大气存在的情况下,地面温度是255K左右,比目前的实际值低30K(假设地球继续反射掉30%左右的入射太阳辐射)。大气的存在使地面温度升高有两个因素:一是因为云和某些大气所含气体(如水汽、二氧化碳和臭氧,但不包括氧和氮)吸收和放出长波辐射。因而,进入空间的地球辐射的很大一部分是在大气中而不是在地球表面产生的;二是因为低层大气(对流层)的温度以6K/公里的递减率随高度而递减。因此,从大气放出的辐射是在比地面温度低的条件下放出的。置身空间的观测员所收到的长波能量与辐射温度255K相一致,这相当于离地面5公里的高度,而地面温度可能会高出30K左右。这种地面温度的反常增高常称之为温室效应,水汽对这种增温的影响最为显著。

一旦大气中吸收长波辐射的成份增加,温室效应将随之增加。决定这种增强量级的

因素不单纯取决于这些成分浓度的大小,还要看它们吸收辐射的能力——这是大气成份分子结构的函数,另外还要看大气中其它气体是否也在吸收同样波长的辐射。水汽和二氧化碳对许多波长的长波辐射均可吸收,其范围在 $4 \sim 8 \times 10^{-6}$ 米和 13×10^{-6} 米以上。在中间的各波长上(有时称为大气窗),无云情况下大气很少吸收辐射,因而能量可以从地面直接逃逸到空间去。在这个谱段上吸收辐射的气体在温室效应中作用更大。

如同下一节中讨论的那样,许多大气污染物都是通过增强地球温室效应而改变全球气候的。有些污染物还通过化学反应使对辐射有影响的气体的浓度发生改变,从而间接地影响气候,这类反应大部分均与高层大气中有臭氧存在相关。臭氧形成于平流层中层氧分子吸收太阳辐射之后,而在平流层低层中,则在产生受激氧原子的光分解过程及同这些受激氧原子进一步反应的过程中被清除。臭氧还会在与某些游离基相关的催化连锁反应中被破坏,这些游离基包括 OH, H, NO 和 Cl。这些游离基可以被直接释放入大气[例如,平流层飞机的废气中产生的氮氧化物(NO)]或者通过来自地面的 H_2O , N_2O , CH_4 以及 CF_4 , Cl_2 , $CFCl_3$ 和 CH_3CCl_3 的各种反应而生成。上述反应中有一些其反应速率与温度相关,因而,惰性气体(如 CO_2)也可以通过辐射所造成的温度变化而改变臭氧的分布,图1概括了上述的许多过程。

3. 大气污染物简述

二氧化碳(CO_2)

1958年以来,大气中 CO_2 的浓度从 315×10^3 ppb 左右增加到 340×10^3 ppb ($1 \text{ ppb} = 10^{-9}$)。这种增加的起因是含碳燃料(如煤、天然气、石油等)的使用。实际上,只有约一半的 CO_2 滞留在大气当中,而其余部分则被海洋所吸收。

目前已开始尝试着对未来100年间大气中 CO_2 浓度的变化进行预报,其步骤是,先

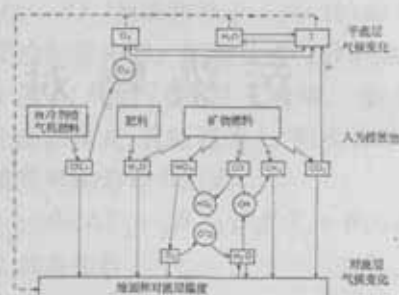


图1 痕量气体引起的气候化学反应(根据 Ram-anathan, 1980)

估算出下个世纪世界范围的能源需求量,再假设其中有多大一部分可通过矿物燃料的燃烧获得;对由此造成的大气 CO_2 浓度的估算通常采用假定留存在大气中的 CO_2 占一固定比例。然而,由于活的有机物既吸收也释放 CO_2 ,这种方法就显得过于简单,另一种做法是,人们设法对海洋和生物圈吸收 CO_2 详细地做出预报。由于对预计中矿物燃料的使用量以及由此造成的 CO_2 在大气与其余碳循环部分之间的分配尚很不清楚,因而预报出的未来大气中 CO_2 浓度的浮动范围难免就大一些。其典型预报之一,就是七十或八十年后, CO_2 将达到 600×10^3 ppb,或者说比估算出的工业前的浓度值约增加一倍。

CO_2 吸收波长在 $15 \times 10^{-6} \text{m}$ 附近的长波辐射。尽管 CO_2 在大气污染物中所占比例最大,然而由于目前的 CO_2 和水汽浓度,大量接近上述波长的辐射已经被大气所吸收,因而, CO_2 浓度增加一倍所造成的影响相对而言是较小的。简单的一维模式认为, CO_2 浓度增加一倍会使全球平均地面温度增加 2 K (表1)。有一项研究认为温度可能会增加 3.5 K,但较为复杂而仍不完善的三维模式给出的结果认为,温度变化只有 2 K 多一点儿(英国国家科学院,1982)。如果以此为基础,则上一世纪预期的增温应为 0.3 K 左右,然而由于其它自然因素,过去的温度变化可能要比这大得多。迄今为止还无法十分有把握地从各种因素中鉴别出 CO_2 的作用。

氧化亚氮(N_2O)

表 1 不考虑大气化学的作用,对各种痕量气体浓度增加而引起的全球地面温度平均变化所做的估算(世界气象组织,1982)

气 体	混合比 (ppb)		地面温度变化 (K)
	基准量	改 变	
*CO ₂	330×10 ³	660×10 ³	2.0
*N ₂ O	300	600	0.3—0.6
CH ₄	1500	3000	0.3
*CFCI ₃	0	1	0.15
*CF ₂ Cl ₂	0	1	0.13
SO ₂	2	4	0.02
O ₃ (对流层)	$F(\varphi, Z)$	$2F(\varphi, Z)$	0.9
O ₃ (平流层)		减少25%	0.5
H ₂ O(平流层)	3×10 ⁵	6×10 ⁵	0.6

* 有明显迹象证实这些气体在对流层大量增加。水汽反馈作用已考虑在内。 $F(\varphi, Z)$ 表示臭氧随纬度和高度的分布

Weiss(1981)的测量表明,1963年以来对流层的N₂O浓度增加了4%。他认为,尽管N₂O的增加有一部分是化肥中氮的硝化引起的,但大多还是矿物燃料的燃烧造成的。进一步的估算表明,到下个世纪末,N₂O的浓度有可能增加一倍。N₂O吸收好几种波段的辐射,其中包括位于大气窗边缘附近的 $7.8 \times 10^{-6} \text{m}$ 左右波长的辐射,因此,尽管目前N₂O的浓度只有300 ppb左右(约比CO₂的浓度低1000倍),然而一维模式预测,除CO₂浓度增加一倍引起增温2 K外,N₂O浓度增加一倍也将引起增温0.3~0.6 K。

氟氯烷(Freon 12和Freon 11; CF₂Cl₂和CFCl₃)

尽管目前氟利昂类(Freons)的浓度很低(只有0.1 ppb左右),然而由于它们在大气中的生存期很长并对臭氧有着催化破坏作用而引起了人们的关注。它们在大气窗中也具有很强的吸收带。工业生产是氟利昂的唯一来源,根据观测,氟利昂每年增加10%左右,这与工业生产的增加很一致。据推测,下个世纪氟利昂的浓度将增加约19倍,引起增温0.5~0.6 K(世界气象组织,1982)。

甲烷(CH₄)

CH₄是一种自然生成的气体,它吸收大

气窗附近的红外辐射。它目前的浓度约为17 ppb。尽管尚未搞清其原因所在,但确有迹象表明,其浓度近年来一直在增高。模式计算得出,CH₄浓度增加一倍将引起全球地面温度升高约0.3 K。

臭氧(O₃)

臭氧吸收入射的紫外辐射,阻止有害于生物过程的某些波段的辐射到达地面。例如,已知的能够引发皮肤癌的过量紫外辐射。

臭氧浓度随高度、纬度和季节变化。然而臭氧层作为抵御紫外辐射的保护屏,其效应仅是大气顶和地面之间臭氧总量(称为气柱密度)的函数。

关于臭氧浓度的早期研究认为,飞机在平流层排放的污染物可能使得平流层臭氧减少,而近期发现,雾剂喷罐释放的氟利昂同样会改变臭氧的浓度。氟利昂对臭氧产生催化破坏作用(也就是说,它们可以破坏掉臭氧分子而自身保持不变;一个污染物分子可以在很多臭氧分子的被破坏过程中起作用)。随着对大气化学有关方面日益深入的了解,过去十年间根据给出的氟利昂浓度增加而对气柱密度变化所做的估算结果有很大的不同。最近做出的估算(世界气象组织,1982)认为,臭氧气柱密度的减少量不会超过百分之几。然而,数值模式的计算结果表明,臭氧浓度在平流层上层可能减少,而在平流层低层则可能增加。由于臭氧还强烈地吸收大气窗中的长波辐射,因此垂直分布的这类变化还将导致地面温度轻微增高。大气中的臭氧有10%产生于对流层中,对流层臭氧增加一倍将使全球地面平均温度增加约0.9 K。应该指出的是,臭氧化学依赖于温度,因此,引起平流层降温的CO₂的增加还将使得臭氧浓度增加(Groves等,1978)。

水汽

一般说来,水汽并不被认为是一种污染物。然而由于它吸收许多波长的长波辐射,因而也被包括在污染物范围之内。大气所能包含的水汽量随温度而迅速增加,任何使得

低层大气增温的变化都极可能引起水汽浓度增加,使得大气进一步增温。这通常被称之为“水汽反馈”,水汽浓度的变化还可能通过扰动化学平衡而改变对流层臭氧分布。

悬浮颗粒物

大气中悬浮的小粒子(气溶胶)可以扰动大气中的太阳辐射通量。据 Dittberner (1978)估算,进入大气的气溶胶中大约三分之一是人类活动造成的,其中包括使用矿物燃料和农业活动。对流层气溶胶的典型寿命只有几天,因此,这种人为气溶胶的浓度随着与工农业活动区的距离拉长而迅速递减。由于气溶胶浓度的时空变化很大,很难掌握气溶胶浓度长期趋势的依据。气溶胶对气候的影响取决于粒子的大小及形状,以及它们的辐射特性和垂直分布。一个气溶胶层既反射也吸收太阳辐射,气溶胶层温度升高,但地面接收的辐射却减少且温度下降。简单地说,人为原因造成的气溶胶对全球气候的影响尚不清楚,也许是很小的,有迹象表明,火山气溶胶进入平流层并在那里滞留数月之久,可能会影响全球的地面平均温度(Hansen 等, 1978)。

总结

以上所述虽不完全,但却包括了可能影响地球气候的诸多因素。世界气象组织(1982)对此曾做过较为完整的考虑,其主要观点是,污染物所产生的影响其程度不仅取决于其浓度,而且取决于它们在什么波长吸收辐射、吸收能力以及在大气中的滞留时间。

4. 简单的气候模式

前面提及的对全球地面平均温度变化所做的预测,基本是运用简单的气候模式得到的,这些模式只用一个大气柱来代表全球的平均情况。本节就模式中反映的物理过程做出描述,并着重说明模式计算结果的局限性。

地面被太阳辐射加热,又因释放长波辐射而冷却,损失的热量通过传导或水分蒸发

而进入大气(图2)。大气因长波辐射而被冷却,同时又被来自地面的热传导以及地面蒸发的水汽凝结时所释放的潜热加热。大气的垂直运动(对流)把热和水汽从地面带入大气,并使其分布在整个对流层,使得全球温度随高度(垂直梯度)均匀递减,大约1公里下降6 K。

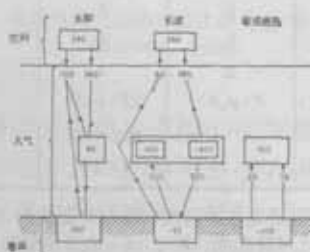


图2 简化的地球与大气的热平衡。图中的数字是根据卫星观测以及大气环流模式计算得出的,只应被看作近似值。图中单位为 W/m^2

辐射对流模式模拟了大气柱各层(即网格点上的过程)。辐射加热或冷却是通过求解大气每层上辐射输送标准方程式而算出的。实现来自地面的热量和水汽再分布的方法是,不允许温度随高度的递减超过某些观测值(例如全球平均值)或设法用显式表示热量的垂直再分布(较完善的模式还可考虑臭氧化学的影响)。把吸收性气体目前分布与扰动后的垂直分布代入模式加以计算比较,即可确定一种给定气体的增加所引起的地面温度变化。

这些模式比较容易建立和使用,而且可以揭示出污染物影响气候的物理过程。例如,一旦典型的大气廓线中的 CO_2 浓度增加一倍,地面的向下辐射通量将随之增加 $1 \sim 2 W/m^2$ 。这与量级为 $100 W/m^2$ 的环境通量相比是很小的(图2)。假如大气廓线可以对辐射有响应(不考虑来自地面的热量输送的增加),对流层将会变暖,向下的长波辐射通量每平方米将会增加3瓦。如果地面的变化对大气具有反馈作用,地面加热将再增加 $12 W/m^2$,这一过程主要是通过前面提到的水汽的反馈作用。表2给出了地面温度的相

表 2 辐射对流模式中, CO_2 增加一倍时在有反馈和无反馈条件下的影响
(Ramanathan, 1981)

	无反馈	对流层的 辐射增温	地面水汽反馈
对对流层的影响	增 温 3W/m^2	增 温	温、湿度增加
地面通量的增加 (W/m^2)	1.2	3.5	15.5
地面温度的变化 (K)	0.17	0.5	2.2

应变化。由此可以看出, CO_2 增加一倍对大气热平衡的扰动很小, 而其它几种正反馈则放大了这种扰动。

在上面的例子中, 假设了大气的相对湿度不变。另一单一大气柱模式的计算结果 (Rowntree 和 Walker, 1978) 表明了计算结果对这一假设和其它假设的敏感性。如果大气的水汽含量 (绝对湿度) 是一个常数, 那么 CO_2 增加一倍将使温度增加 1.29K , 如果使水汽浓度随温度增加, 而相对湿度保持不变, 则温度增加不是 1.29K , 而是几乎加一倍。这些假设没有一个是正确的, 尽管人们一般认为第二个假设是较为真实的。其它的选择将影响响应的大小。例如, 关于 CO_2 增加一倍引起的响应, 在模式中把云包括进去较之不包括云要小 (表 3)。在低纬度地区, 地面接收的因 CO_2 增加而引起的增加热量大多又被蒸发水汽转送到大气当中, 并作为潜热释放出来。如果把这一过程考虑进去, 同使用全球平均递减率的情况相比, 地面增温小一些, 而大气增温则大一些。

表 3 辐射对流模式的结果对附加假设的敏感性 (Rowntree 和 Walker, 1978)

假 设	CO_2 增加一倍引起的 温度变化 (K)
绝对湿度不变	1.29
相对湿度不变	
a) 无 云	2.46
b) 平均云量	2.20
c) 平均云量、考虑潜热	1.40

许多支配气候的因素, 如山岳形状、海洋温度、风、洋冰和陆-海差异等不可能包括在单一气柱模式之中, 而且这样一个模式也不能用来预报给定季节、给定地区的变化。充其量, 它只能用来对全球地面平均温度可能发生的变化进行估算。三维气候模式具有更详细估算气候变化的潜力, 这正是农业和其它工业活动所需的。

5. 三维模式

三维大气环流模式中, 大气在垂直方向分为若干层次, 各个层次又划分出若干个网格点, 温、湿和风值就分布在全球的各个网格点上。在英国气象局的 5 层模式中, 网格点的间距约为 330km , 每一时刻的大气状态以 10^5 个数字表示。根据假定系统的质量、热量、水汽保持不变, 通过在网格点上求解运动方程和热力方程, 这些数值依时间步长一步步更新。网点值每 15 分钟更新一次, 使用 IBM 360/195 型计算机对模式进行计算, 作 24 小时模拟需要 15 分钟的中心处理时间。

许多大气过程发生在比水平和垂直网格距小得多的尺度上 (例如对流降水), 因而无法对它们做出确切的模拟。它们的影响是根据真实大气的观测结果、实验室实验结果或较详细数值模式的计算结果以简化的形式 (参数化) 来表达的。

从原理上说, 大气环流模式可以用来根据一种给定的起始大气状态预报个别扰动的逐日发展情况。就专门为此项研究设计的数值模式来说, 其预报精度随积分时间的增长而降低, 到 2 或 3 周之后, 预报场就几乎或根本没有预报技巧了。然而对气候预报来说, 模式的模拟就要长得多 (数月甚至数年之长), 可以用来进行长期平均状态的模拟研究。通过把模式中考虑了当前洋面温度、洋冰覆盖面积、 CO_2 浓度所得的模拟结果与气候资料进行比较, 可以对模式做出评价。例如, 英国气象局 5 层模式求得的 4 年积分的三个北方夏季地面平均气温分布 (图 3a) 就

包括了观测到的大气环流(图 3b) 的全部主要特征,其中包括以冬季陆地和夏季海洋为中心的环流,伸展到亚洲季风热带低压区以及北极以南海上的低压带。

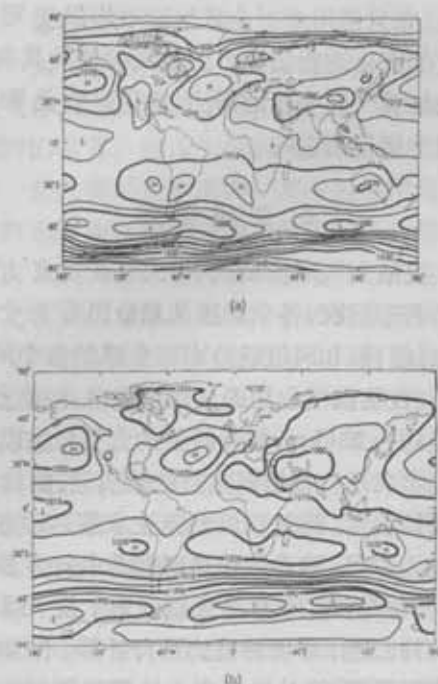


图 3 平均海平面气压(等压线间隔为 5 百帕)
a. 英国气象局 5 层模式计算结果(6、7、8 月); b. 实况, 7 月(据 Schutz 和 Gates, 1972)

标准模式得出的模拟(对照积分)同只改变有关参数(如 CO_2 浓度)的另一模拟(异常积分)相比较,就能对气候变化做出计算。然而与真实大气一样,模式大气同样显示了固有的年际变化,因而必须通过统计检验以确定对照积分与异常积分之间的差异是由于模式变化(如 CO_2 增加)造成的,而不是偶然发生的。

一个完整的气候模式应该考虑到对气候有影响的全部因素,其中包括海洋和陆地冰盖。海洋-大气耦合模式很不成熟,迄今为止,大气与海洋以及主要冰原之间细致的相互作用还没有被考虑到气候模式中去。这里,将对某一模式所获得的一些结果加以描述。在这个模式中,陆地冰盖被看作是一个常数;海冰覆盖面积不变,但规定洋面温度增加 2K, CO_2 含量增加一倍(Mitchell, 1983)。

海洋温度的升高很大程度上是根据单一气柱模式的计算结果而规定的。

图 4 表示因 CO_2 浓度以及洋面温度增加而引起冬季(12~2 月)和夏季(6~8 月)地面温度变化,这种变化随季节和地区而有着明显的差异。在冬季,北纬 55°附近地区的变化尤其大,其原因部分是由于模式中雪线后退的地区陆地表面面对太阳辐射的吸收增加了。在冬季日照很少的斯堪的纳维亚和苏联西北部地区,引起气温升高的原因是由于增强的西向气流使亚洲大陆吹来的冷风频率减小。在夏季,最大幅度的升温(4~5K)发生在欧亚大陆中部。在欧洲西部地区存在一个

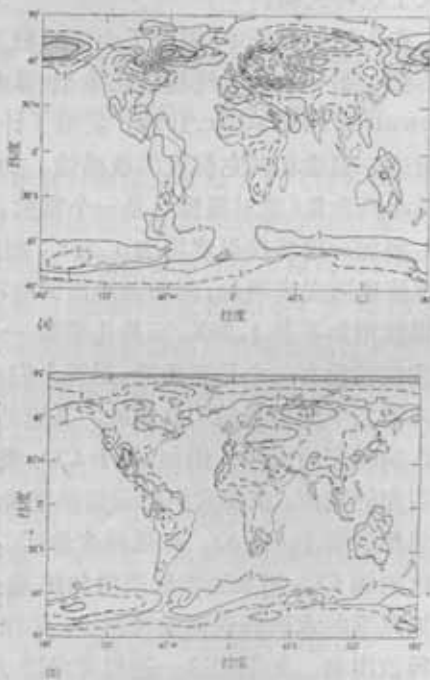


图 4 CO_2 增加一倍且海面温度增加 2K 时的模式地面温度的变化。等值线间隔为 1K, 单数值用虚线表示, 减温区用阴影表示。
a. 冬季(12、1 和 2 月); b. 夏季(6、7 和 8 月)

明显的升温最低值,它可能是因为盛行西风气流(图 4a)从只增温 2K 的海洋带来了温暖空气造成的。降水的季节变化幅度更为明显(图 5),总的说来,亚热带大部分地区降水量减少,而在热带地区、夏季大陆的东海岸沿线以及中高纬度地区——尤其是冬季半球——的降水量一般是增多的。6~8 月间,

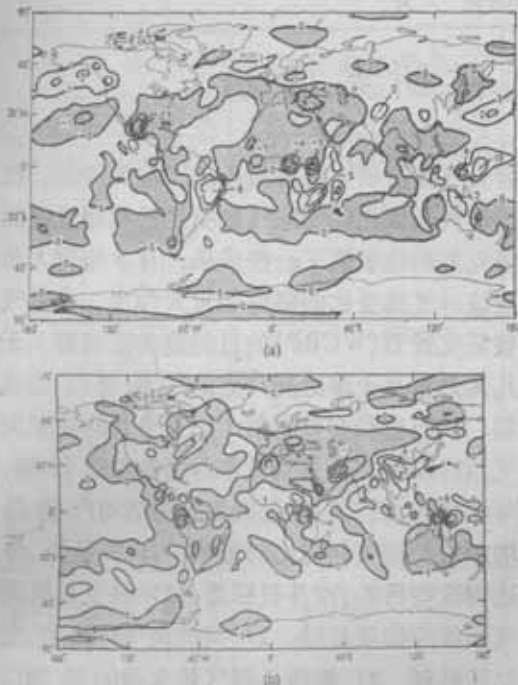


图 5 CO_2 增加一倍且海面温度增加 2K 时的模式降水的变化。等值线间隔为 1 毫米/天；降水减少区用阴影表示。

a. 冬季(12、1 和 2 月); b. 夏季(6、7 和 8 月)

发生大面积降水增多和减少现象的区域要更北一些。因此,有些地区在冬季干旱一些,而在夏季则潮湿一些,反之亦然。

关于海面温度均匀增加的假设可能不真实,因而进行了再次积分,在这次实验中,海洋的升温随纬度增加,高纬度地区的变化比赤道地区大两倍多(Mitchell 和 Lupton, 1983)。图 6a 和 6b 分别给出本次实验和以前实验中土壤湿度(地面湿度)的变化。两次实验做出的预报均认为,位于 $30\sim 60^\circ\text{N}$ 之间的北美和欧亚大部地区的地面较为干旱,而在墨西哥、亚洲东南部以及非洲西南地区,地面则较为潮湿。须指出,预报的变化在撒哈拉和北美东部地区不一致。这些结果对评价迄今已获得的区域气候变化预报的可靠性是有所帮助的。此外,还发表过少量用气候模式对季节详细变化进行模拟的结果(Manabe 和 Stouffer, 1980),他们用一个大气模式同一个海洋上层简单模式相耦合对 CO_2 增加到四倍时所能造成的影响做了描



图 6 夏季(6、7 和 8 月)模式土壤湿度的变化。

等值线间隔为 50 毫米;减少区用阴影表示。

a. 由于 CO_2 增加一倍且海温普遍增加 2K 造成的;
b. 由于 CO_2 增加到四倍且海温的上升随纬度而增大所造成的

述。尽管使用的模式不同,但水份循环的变化大致同这里的结果是相类似的。

6. 结束语与总结

本文较为详细地描述了污染物影响气候的物理过程,以及如何在数值气候模式中表述这些过程。尽管因污染物增加引起的辐射加热的最初改变在大多数情况下已经比较清楚,但对大气随后的响应以及其它影响气候的因素还了解甚少。

可以通过若干条途径了解人类对气候的影响。随着对一些化学活跃气体的浓度和反应速率的测量值的不断修正,对这些化学活跃气体作用的估价也在不断地改变。目前正在通过观测研究和数值实验对气候模式中的物理过程参数化进行改进。最近的气候模式用显示方式考虑海洋。矢量计算机的问世提高了计算处理能力,使得具有适当水平分辨的模式能够积分到几十年而不是几年。然而,未来许多年中,了解气候和气候变化问题的研究工作将是大气科学家的主要任务。

过去数十年间的测量表明某些痕量气体浓度在增加。这类增加很大程度上可以归因于人类的活动。预计那些对辐射有影响的气

体的增加将引起全球地面平均温度上升。各种成份引起升温的量级不单纯取决于其浓度增加的程度,而且取决于它对长波辐射的吸收能力以及它在什么波长上吸收长波辐射。尽管目前的估算认为总的臭氧量不会受到很大影响,然而化学活跃成份的增加将会改变臭氧的垂直分布。

现已做出的有关污染物影响气候的声明大多以单一气柱模式的计算为依据。计算结果在很大程度上取决于模式所含的假设,且

许多影响气候的因素都没有考虑进去。甚至在用于研究 CO_2 增加所可能带来的后果的三维模式中,也做了大量的简化(尤其是海洋和云的处理方面)。然而这些研究表明,与全球增温相伴随的变化可能会随季节和地理位置而有重大差异,而且水份循环的变化也许与温度变化一样重要。

李丽译自英国“The Meteorological Magazine”1984年1月

史国宁校