

大气中二氧化碳含量的预报

(苏)O.K.萨哈罗夫 C.B.罗曼诺夫

提要 以世界能源发展基本方案(其中拟尽可能利用有机燃料的代替能源)为依据,提出了五种2100年以前向大气排放二氧化碳强度的预报方案。这些方案的区别在于所利用的有机燃料中煤、石油和天然气所占的比例不同。借助碳循环模式为各个方案求得2100年以前的大气二氧化碳分压。这五个方案由于考虑了模式参数的不确定性,其预报的二氧化碳浓度范围比1985年菲拉赫会议所得结果要小。

近年来人为二氧化碳对大气的污染已成为特别令人瞩目的课题。由于二氧化碳浓度增加,对大气辐射平衡产生影响。大气中的二氧化碳、水汽以及目前在影响程度上还相对小一些的臭氧、甲烷、氧化氮和其他光学活性气体都是控制气候的重要自然因素。计算表明,全球气候变化的最大危险确实与二氧化碳浓度的增加有关。二氧化碳气体是在燃烧煤、石油和天然气有机燃料的过程中释放出来的。自十九世纪中期至今,工业生产释放的二氧化碳已达 175×10^{15} 克。农业生产活动中砍伐和焚烧林木产生的其他 CO_2 源,对现代二氧化碳浓度的形成也起了很大的作用。

能源发展的长期预测模式 研制世界能源发展的长期预测方案并在此基础上计算出未来年代如近期(到2010年)和中期(到21世纪末)大气中二氧化碳含量在人为气候变化研究中有极为重要的意义。

不同的有机燃料释放二氧化碳的数量是不相同的。本文考虑到二氧化碳污染大气这个影响大自然和气候的生态因子,提出燃料能量平衡的最优化方案,并从这个观点出发,对文献[5, 6, 9, 12]提出的有机燃料能源发展的长期预报作出评价,而且指出采用不会导致2100年二氧化碳增加一倍的燃料能量平衡方案是可能的。作为人类为大气二氧化碳含量变化研究的基本点使用564ppm这个值,此值相当于二氧化碳分压比工业化前增加一倍^[1]。

本文以斯迪利科维奇在文献[9]中提出的世界能源发展远景规划模式为基础,主要原理如下:

1. 预计21世纪的前半期世界各国人口的增长速度将减慢。到2100年,全球人口将稳定在100—120亿水平上^[8]。
2. 下世纪末,人均能源需求量趋于稳定,稳定时的水平为6千瓦(热)·年/(人·年)

(单位“千瓦(热)·年”系表示消耗于取暖和生
产电能的初级热能。从1千瓦(热)·年的初
级热能中可获得大约1/3千瓦(电)·年的电
能,1千瓦(热)·年约等于1吨标准燃料)。
必须指出,这是最低的预测值之一,此预测
值已充分考虑到近年来出现的能量储存工艺
的发展趋向。

3. 在不久的将来,燃料能量平衡不可能
仅依赖某一种能源,即使这种能源(如核能)
的一系列参数具有异常的吸引力。在近期和
中期(即到21世纪末)内,有机燃料(煤、石
油、天然气)在社会生活中将继续起重要的
作用。

4. 在全球燃料能量平衡系统中,世界上
有代表性的发展趋势是传统能源(煤、石油、
天然气)所占比例下降。如果说目前传统能源
所占比例为90%左右的话,那么到21世纪
末这个比例将不会超过17—18%,因为有机
燃料将被某些替代能源(我们这里指的是核
能、快速中子核能、热核能和再生能源)所
取代。

文献[9]中的能源需求预测(以下称之为
第一方案)绘于图1。该方案中燃料能量平衡
的最大部分(根据经济上和技术上的理由)是
替代能源。下面我们均作这样的假定:各种
替代能源所生产能量的绝对值与第一方案一
样,而且不能超出太多。该假定与最近的核
能源发展的一些预测值相吻合,这些预测值
已考虑到近来出现的核能持续增长的因素^[15]。

大家知道,各种有机燃料释放的二氧化
碳或碳的强度(10^{15} 克/太拉瓦(热)·年)*是
不同的(见表1)。

表 1

	CO ₂	C
煤	2.81	0.77
石 油	2.04	0.66
天 然 气	1.61	0.44

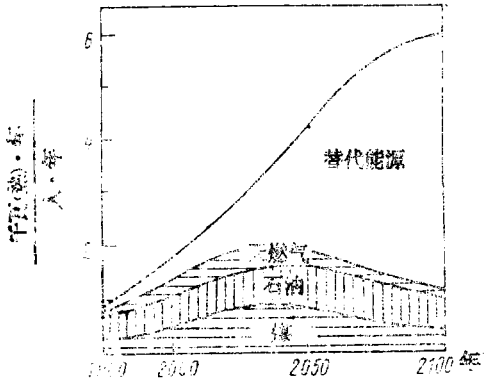


图 1 初级能源的需求预测

从该表所列数据可知,煤是生态学上“污
染”最严重的一种燃料。因此我们考虑以下两
个关于煤能源的发展方案:模式I与国际应
用系统分析研究所的预测^[12]一致,耗煤量最
少;模式II(图2a的曲线2)是引自库兹明和
斯多利亚列夫斯基^[5]的资料。图2a中的曲线
3是斯迪利科汶^[9]的预测。

对于石油,模式I(图2b的曲线1)的耗
油量也是最小的,接近于文献[12]和[5]之
值;模式II(图2b的曲线2)基本上同文献
[9]之值(图2b的曲线3)。两个模式的差别
仅反映在2030年以前的年代,从图上可看出
模式II与赫费尔^[10]的预测值是相同的。

我们认为天然气作为最经济的“洁净”有
机燃料,将会以极快的速度得到利用。文献
[12]也提出了这样的发展速度,如图2b曲线
4所示,它比文献[14]对未来天然气利用的
估计值高得多。

为了研究可能导致的生态后果,我们对
煤和石油采用模式I和II,但天然气只用一
个模式(见表2),并根据这些模式制订出考
虑了燃料能量平衡结构可能变化而导致未来
二氧化碳释放强度发生变化的方案。在这些
方案中替代能源的绝对值与第一方案相同。

第二方案 在燃料能量平衡系统中替代
能源的总需求和所占比例与第一方案相同。
但预测值中各种传统能源所占的比例有所不

* 太拉瓦(热)·年是能量单位,1太拉瓦(热)·年等于
 10^{12} 瓦年,或 10^6 兆瓦年——译注。

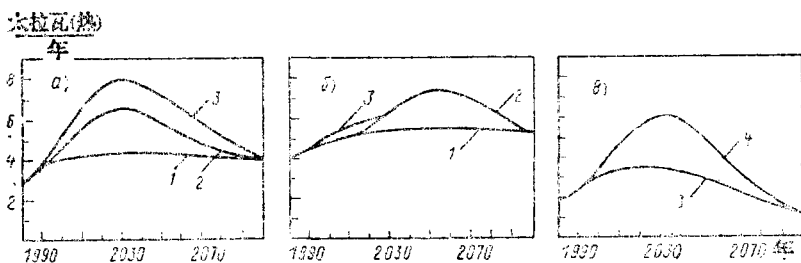


图 2 煤(a)、石油(b)、天然气(c)能源的发展预测。1—模式I；2—模式II；3—不包括加工煤所得到的合成、液态和气象燃料的预测值；4—最大的预测值

表 2 初级能源的需求量(太拉瓦(热)·年/年)及贮藏量(太拉瓦(热)·年)

	模式	1980	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100	合计	贮藏量
煤	I	2.8	3.7	4.1	4.2	4.3	4.4	4.3	4.3	4.2	4.2	4.1	4.1	4.0	493	1579
	II	2.8	3.7	4.7	5.8	6.2	6.5	6.3	5.7	5.3	4.8	4.5	4.2	4.0	611	
石油	I	4.3	4.5	4.8	5.1	5.2	5.3	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	622.5	837
	II	4.3	4.5	4.8	5.1	5.7	6.4	7.0	7.4	7.3	6.9	6.4	5.8	5.4	795.5	
天然气		1.8	2.3	3.4	4.6	5.5	6.0	5.8	4.9	4.0	3.2	2.4	1.7	1.2	453	538

同。气体能源的发展与文献[12]的数值相当(图 2B 的曲线 4)。石油利用的发展速度同模式 II。燃料能量平衡的其余部分(在第一方案的水平以下)主要是煤。在这种情况下,煤能源拟按模式 II 发展,即与文献[5]相同,1980 至 2100 年期间第一方案的有机燃料总需求量为 1850 太拉瓦(热)·年。

第三方案 本方案的石油和天然气能源发展趋势同第二方案,煤能源发展趋势与模式 I 一致。1980 至 2100 年有机燃料的总需求量为 1742 太拉瓦(热)·年。由于作为燃料的煤的使用量最少,二氧化碳对大气的污染程度将有所减少。

第四方案 与第三方案不同之处是石油能源按模式 I 发展,再加上假定煤的利用量最小,故就二氧化碳的释放对大气污染作用居第二位(在煤之后)的石油来说,其最低需求量有所增加。1980 至 2100 年的能源需求量为 1568 太拉瓦(热)·年。

第五方案 煤能源的发展趋势采用最大值方案(模式 II),而石油能源则按模式 I 发展。1980 至 2100 年的能源总需求量为 1636 太拉瓦(热)·年。

应该指出,上述各种预测方案都有一个共同特点,就是矿物燃料利用量的增加趋势大约都将持续到 2030 年,其后世界燃料能量平衡系统中矿物燃料的这种增长趋势开始被替代能源所取代。这种推测也是研制我们所采用的第一方案的基础。

必须指出,上述预测方案还有一个特点,就是在最大限度地利用石油和天然气的情况下,到 21 世纪末,对它们的总需求量将接近其经济贮藏量(见表 2)。这里的经济贮藏量就是有效燃料贮藏量(它不同于地质贮藏量),对于有效燃料贮藏量的开采,若考虑到将来出现的改变,从经济上看是合算的。据文献[11]的意见,有以下三种经济估价:一是石油和天然气其开采价值与石油等值价格相比,每桶不超过 12 美元;二是每桶 12—20 美元;三是每桶 20—25 美元。按所拟定的方案,到 2100 年对煤的总需求量也不会超过其经济贮藏量的一半(见表 2)。

现在已根据表 1 列出的各种有机燃料的碳元素释放强度资料,求出了上述五种世界能源发展方案下碳元素进入大气的速率 dM_r/dt 值(10^{15} 克碳/年),如图 3 所示。

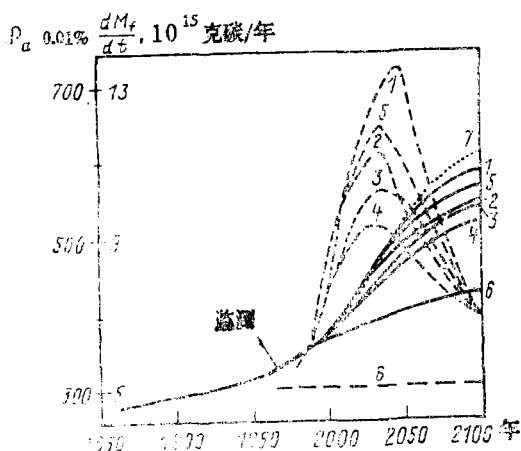


图3 工业生产对碳元素的释放速率 dM_f/dt (虚线1—6)和世界能源按各种方案发展情况下(实线1—6)用带积分系数的非平衡模式计算的大气二氧化碳分压 P_a 。7— P_a 值用扩散模式计算(第一方案), $K = 3$ 厘米²/秒

大气中二氧化碳浓度的计算 研究因人为因素造成大气中二氧化碳浓度的变化,首先要研究自然界的碳循环包括海洋、大气和生物之间的碳质量通量交换。现在流传最广的是所谓箱室碳循环扩散模式。本文根据不同的能源发展方案评价大气中二氧化碳浓度增长情况时采用了文献[1, 4]中提供的带积分系数的非平衡模式(НМИК)。该模式可计算出由第一至第五方案决定的并受扰动函数 $M_f(t)$ 的影响所导致的五种箱室碳含量变化;大气为 δM_a ;准均匀上层海水为 δM_1 ;位于下部的深层海水为 δM_2 ;活跃的陆地生物层为 δM_b ;土壤腐殖质为 δM_D (图3)。带积分系数的非平衡模式的方程组有如下形式:

$$\begin{aligned} M_f(t) &= \delta M_a(t) + \delta M_1(t) + \\ &\delta M_2(t) + \delta M_b(t) - \delta M_D(t), \\ \delta M_i &= M_i - (M_i)_0, \\ \delta M_b + \delta M_D &= \delta M_a \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dM_1}{dt} &= Sh_1 \frac{d\Sigma_1}{dt} \\ &= SV_L k_o (P_a - P_w) - SV_{md} (\Sigma_1 - \Sigma_2) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dM_2}{dt} &= h_2 S \frac{d\Sigma_2}{dt} \\ &= V_{md} S (\Sigma_1 - \Sigma_2) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 P_a 表示大气中的二氧化碳分压; Σ 表示溶于水中的气态和氧化碳离子的二氧化碳浓度之和; P_w 表示溶于水中的二氧化碳分压; k_o 表示溶解度系数; V_L 表示大气与准均匀上层海水之间气体交换的特征速度; V_{md} 表示准均匀上层海水与其下部深层海水之间气体交换的特征速度。

(1)式是一个平衡方程。(2)式描述性质相近的上层海水中所溶解的无机碳元素总含量 $M_1 = Sh_1 \Sigma_1$ 的变化,式中 h_1 为上层海水的厚度, S 为世界海洋面积。

二氧化碳既能以溶解气体存在于海水中,也可以碳酸的形式存在于海水之中。碳化合物离子 y 是海水中无机碳 Σ_1 的主要部分。可溶性气态二氧化碳的浓度 $x = k_o P_w$ 是 y 的一小部分,但正是它决定了与大气之间的气体交换强度——用 $SV_L k_o (P_a - P_w)$ 一项加以描述,其中 $k_o P_a$ 表示大气与海洋交界面上的二氧化碳浓度, $k_o P_w$ 表示准均匀的上层海水中的二氧化碳浓度。 $P_w = P_w(\Sigma_1)$ 式根据准确地描述海水中二氧化碳溶解过程的水文化学关系式计算。

在带积分系数的非平衡模式中是假定海洋由准均匀上层海水和均匀混合的深层海水两个贮存库组成的^[1]。因为海洋的深层与准均匀层之间存在一个密封层(它形成于整个混合液体之中,那里的海水密度随深度而增加),所以可以认为,向海洋深层扩散的二氧化碳通量 F 与海洋上层和深层之间碳平均总浓度的落差成正比,即 $F = SV_{md} (\Sigma_1 - \Sigma_2)$ 。比例关系 V_{md} 由密封层的积分扩散阻力决定(由此而得名带积分系数的模式)。就海水上层与较深层之间总无机碳的年平均交换强度而言,在上层海水的季节变化过程中,具有均匀速度值的参数 V_{md} 定为 5×10^{-5} 厘米/秒。根据海洋中不同曳光管传播试验资料得出了近似的值。

文献[1]还研制了另一个方案(ⅡM),在此方案中,半无限深层海水的气体通量 F 的计算方法与带积分系数的非平衡模式不同,这里用的是求解不稳定扩散方程方法,其边界条件是准均匀上层海水中的 $\delta M_1(t)$ 。根据深海中不同曳光管传播的资料,取扩散系数 k 值为3厘米²/秒。

大气与准均匀上层海水之间的碳交换可用通过空气与海水交界的有效气体交换速度 V_L 表征。计算时利用的这个积分系数值 $V_L = 39 \times 10^{-4}$ 厘米/秒。这个参数的终值需考虑准均匀上层海水的滞后性,并用以确定准均匀上层海水与大气之间化学平衡的消失(由此在二氧化碳浓度计算方法的命名中引出“非平衡模式”一词)^[4]。

在计算中假定,人类活动对地球生物量的影响导致生物量成为向大气输送 CO_2 的一个辅助碳源,其强度为 $\frac{d(\delta M_o)}{dt} = 0.5 \times 10^{15}$ 克/年。

在假定能源按第一至第五方案发展的条件下,根据带积分系数的非平衡模式和扩散模式对大气二氧化碳分压 P_a 的变化的研究结果已绘于图3。该图还给出第六方案求得的线性排放的计算值。

1860—1984年大气中二氧化碳分压的模式计算结果与文献[16]确定的值和实际探测值相符。

如果生物排放出的二氧化碳浓度在将来不发生变化(约 0.5×10^{15} 克/年),则在大气中大约总会保留有工业企业和生物源释放的二氧化碳总量的一半。

尽管每年进入大气的二氧化碳开始减

少,但在21世纪后50年,大气中二氧化碳浓度的增长过程仍将持续。

大气中二氧化碳浓度达到最大值的时间将出现在排放速度 dM_f/dt 达到最大值之后。两者的时间间隔为100年左右(这一时间间隔对二氧化碳是有代表性的)。

本文的计算工作偏重于用带积分系数的非平衡模式而不是扩散模式,这不仅不会有意地加大二氧化碳浓度,相反还会明显地减缓二氧化碳浓度预测值的上升幅度。

计算精度完全取决于带积分系数的外平衡模式的参数精度(主要是 V_{ma})。二氧化碳浓度预测值列于表3。

表3 未来大气中二氧化碳分压
预测值的幅度

2000年	2025年	2050年	2075年	2100年
375—385	430—445	490—550	530—610	540—640
370—385	420—445	430—550	460—610	475—640
360—380	380—470	400—580	410—720	420—900

表中第一行数字表示第一方案的计算值。第二行数字表示考虑了燃料能量平衡结构的各种可能变化后的计算值。第三行数字表示菲拉赫会议^[16]提出的预测值。该表说明菲拉赫会议作出的二氧化碳浓度预测值比本文在假定诸如燃料能量平衡结构改变条件下所得到的预测值有更大的不确定性。

(参考文献略)

许泊天译自苏联《气象与水文》1988年第

9期

元来福校