

使用星载红外分光计在全球探测大气温度廓线

张肇先

(中国科学院上海技术物理研究所)

数值天气预报,除了需要建立完善的理论和具备运算速度快、存贮量大的计算机以外,还必须在全球范围内不断取得三维空间的温度-气压场和湿度场的数据。

苏联在三十年代初发明了无线电探空仪是气象探测史上的第一次飞跃。它改变了气象观测局限于地面的状态。然而在全球范围内,包括占全球面积七分五的海洋地区和陆地上人烟稀少的地区进行大气探测取得气象要素的数据,还是在气象卫星问世之后。所以,人们把大气的卫星探测技术视为气象探测史上的第二次飞跃。

星载探测仪器按其工作原理可分为主动式和被动式两大类,亦可按其工作波段划分为光学探测仪和微波探测仪。一般说来,被动式仪器体积小,重量轻,功耗低,在技术上容易实现。按照仪器的工作波段比较,光学(包括红外)探测仪比微波探测仪可以获得更高的空间分辨率,但其使用却受云层的影响较大。

目前,从卫星探测大气温度廓线的技术都使用被动式红外手段。本文要介绍的是限于在这一领域中占主导地位的频率扫描法的基本原理和主要仪器。对探测原理感兴趣的读者可以查阅文献[1]。

一、大气辐射传递方程

被动式大气温度红外探测手段的原理完全建立在不同光学通道的大气辐射传递特性的基础上。因此,首先必须建立大气辐射传递方程式。

如图1所示,现在考虑在高度为 h 处有一物理

具有单位截面积的长度为 dh 的一小段大气柱。在红外波段毋需考虑散射过程。于是这小段大气柱向上的大气辐射率 $I_\nu(h)$ 的变化为

$$dI_\nu(h) = \epsilon_\nu(h)\rho dh - k_\nu I_\nu(h)\rho dh. \quad (1)$$

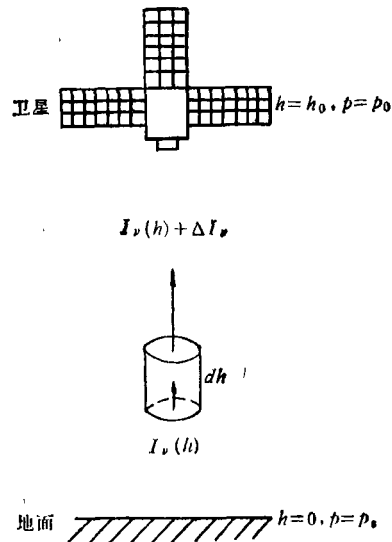


图1 大气红外辐射传递过程示意图

(1)式是大气辐射传递方程的微分形式,其中 k_ν 和 ϵ_ν 分别表示波数为 ν 的质量吸收系数和辐射系数,对于给定的物质它们都是波数 ν 的函数, k_ν 随温度 T 和压力 p 稍有变化; ρ 为吸收气体的密度。就被动式红外大气温度探测而言,通常选用含量基本恒定,吸收比较强烈的 CO_2 $15\mu\text{m}$ 吸收带和 $4.3\mu\text{m}$ 吸收带。

CO_2 的体积混合比为0.033%左右^[1],可以认为从地面到90km高度都是均匀混合的^[2]。在数学上可以把 CO_2 体积混合比当作常数处理。

如果由图1表示的某一小段大气柱在任一

瞬间得到的能量与失去的能量相等, 则此小段大气柱处于局地热力平衡状态, 服从基尔霍夫定律, 即

$$\varepsilon_{\nu} = k_{\nu} B_{\nu}(T), \quad (2)$$

其中 $B_{\nu}(T)$ 为普朗克公式给出的黑体辐射率,

$$B_{\nu}(T) = \frac{c_1 \nu^3}{e^{c_2 \nu/T} - 1}, \quad (3)$$

这里

$$c_1 = 1.1910659 \times 10^{-5} \text{mW/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1},$$

$$c_2 = 1.438833 \text{cm} \cdot \text{K}.$$

可以认为地球大气在 70km 以下存在局地热力平衡状态^[5].

将(2)式代入(1)式, 从地面到卫星高度进行积分, 可以得到单色光的大气辐射传递方程的积分形式:

$$I_{\nu} = I_{\nu s} \tau_{\nu s} + \int_0^{h_0} \rho(h) k_{\nu}(h) B_{\nu}(T) \tau_{\nu}(h) dh, \quad (4)$$

其中

$$\tau_{\nu}(h) \equiv \exp \left\{ - \int_h^{h_0} \rho(h) k_{\nu}(h) dh \right\}, \quad (5)$$

$$\tau_{\nu s} \equiv \tau_{\nu}(0),$$

由(5)式可得

$$\frac{\partial \tau_{\nu}(h)}{\partial h} = -\rho(h) k_{\nu}(h) \tau_{\nu}(h). \quad (6)$$

对于红外波段, 我们可把地球表面视为黑体, 则 $I_{\nu s} = B_{\nu}(T_s)$. 同时考虑(6)式, 并且为方便起见, 一般把作为自变量的高度 h 换为 $\ln p$ (p 表示气压), 则(4)式可以改写为

$$I_{\nu} = B_{\nu s} \tau_{\nu s} + \int_{\ln p_s}^{\ln p_0} B[T(p)] \cdot \frac{\partial \tau_{\nu}(T, p)}{\partial \ln p} d \ln p, \quad (7)$$

$$\nu = \nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m.$$

(7)也常常改写成差分形式:

$$I_{\nu} = B_{\nu s} \tau_{\nu s} + \sum_{j=1}^{N-1} B_{\nu j} [T(p)] \Delta \tau_{\nu j}(T, p), \quad (8)$$

$$\nu = \nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m.$$

在(7)式中, 有待于求解的未知函数 $B[T(p)]$ 包含在积分号内. (7)式为线性第一类 Fredholm 积分方程^[4], 其中 $\frac{\partial \tau}{\partial \ln p}$ 为核函数.

从物理上来看, $\frac{\partial \tau}{\partial \ln p}$ 表示各高度大气的辐射

对星载仪器测量出的大气辐射率 I_{ν} 的贡献, 通常称为权重函数. 实际上, 通道是有带宽的. 但是只要把(7)式中的 $\tau_{\nu s}$ 和 $\partial \tau / \partial \ln p$ 换成归一化数值就行了.

如果能恰当地优选出一组光学通道, 其中各个通道分别主要反映某一高度范围内的大气温度垂直分布情况, 换言之, 如果能使各通道的权重函数恰当地分布在被我们关心的高度范围内, 则这组通道就能最好地提取大气温度垂直分布的信息. 反之, 在使用这组通道测量出大气辐射率 $I_{\nu} (\nu = \nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m)$ 之后, 就能从(7)式反演(即求解)出大气温度垂直分布, 也就是大气温度廓线 $T(p)$, 提交给天气预报部门作数值天气预报之用.

这里必须指出, 由(7)式表示的是晴空大气柱的大气辐射传递情况, 也就是说在仪器视场中不存在云. (7)式给出的大气辐射率是所谓晴空柱辐射率. 事实上, 全球面积的 50% 以上都在不同程度上被云遮蔽. 因此, 如果要使用(7)式反演出大气温度廓线 $T(p)$, 必须对测量数据 I_{ν} 进行数学处理^[5] 或者从探测方法上另寻途径^[6].

一般采用的是双视场处理方法^[5], 即利用两个相邻视场的测量值, 并引用地面温度的信息推求出晴空辐射率. 由于在全球某些地区特别是某些时候的地表面温度并不清楚, 相邻视场中的云高并不一定相同, 都会产生较大的误差. 因此要消除云对测量数据的污染 (contamination), 还必须从增加通道以增加有关云的信息这一根本途径着手.

研究表明^[6], CO_2 15 μm 吸收带通道对云层的存在比较灵敏, 此外它对大气冷区的温度也比较灵敏, 而 CO_2 4.3 μm 吸收带对大气暖区的温度比较灵敏. 因此, 高性能的大气温度探测器(如美国的 HIRS-2)都同时具备 15 μm 通道和 4.3 μm 通道. 前者用于测量云量和云高并且主要用于测量大气冷区温度, 后者用于测量大气暖区温度(对流层下半部及平流层中

部)。这样可以利用单一视场几个通道的数据确定云量和云高^[7]。

现在还有人继续考虑存在多云层的情况，提出四视场方法^[8]。

在反演时使用的大气辐射率数据都是在无云条件下的直接测量值或者是经过处理得到的计算值，也就是说都是晴空辐射率。

二、反演方法

(8)式可以按照矩阵形式改写成

$$Af = G, \quad (9)$$

这里

$$A = [\Delta\tau_{mn}], \quad (10)$$

$$\Delta\tau_{mn} = \begin{cases} \frac{1}{2}(\tau_{mn} + \tau_{m,n+1}) & (n=1), \\ \frac{1}{2}(\tau_{m,n-1} - \tau_{m,n+1}) & (1 < n < N), \\ \frac{1}{2}(\tau_{mn} - \tau_{m,n-1}) & (n=N), \end{cases} \quad (11)$$

$$f = [B_1, B_2, \dots, B_N]^*, \quad (12)$$

$$G = [I_1, I_2, \dots, I_M]^*, \quad (13)$$

其中*表示转置， M 表示通道数， N 表示分层数， $n=1$ 表示最高的水平， $n=N$ 表示地面。显然， $M \geq N$ 。当 $M > N$ 时，(9)式为矛盾方程组，可以通过最小二乘法即

$$(Af - G)^*(Af - G) = \text{极小值},$$

求出最小方差解^[1]

$$f = (A^*A)^{-1}A^*G. \quad (14)$$

初期的研究^[9]早就指出，随着分层数 N 的增加，解起先趋于准确，但是后来准确度开始变坏。至于何时变坏则依赖于 G 的准确程度。如果 G 的误差较大，解变坏得早一些。每个近似解的误差会变成 p （或 h ）的强烈的振荡函数。显然，这种解是根本不能使用的。

为了解决这个问题，从数学上讲必须引入附加条件（即约束），从众多可能的解中挑选出

比较合乎实际情况（即满足约束）的解来。从物理上说，所谓求解问题就是利用已知信息推算待求量。测量值越多或越准确，信息量越大；测量值对于待求量越灵敏，信息量也越大。求解本文中的积分方程问题从实质上看，也可以看成是如何巧妙而合理地添加信息以及如何使用手头中的信息使之在求解过程中得到充分利用的问题。

通常采用的添加信息的途径是引入大气温度廓线的先验值^[1,10]。设与标准大气（或某地区某季节的平均）温度廓线相对应的大气辐射率计算值为 $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \dots, \bar{I}_N$ ，令

$$f' = [B_1 - \bar{B}_1, B_2 - \bar{B}_2, \dots, B_N - \bar{B}_N]^*, \quad (15)$$

$$G' = [I_1 - \bar{I}_1, I_2 - \bar{I}_2, \dots, I_N - \bar{I}_N]^*, \quad (16)$$

同时考虑存在测量误差

$$\epsilon = [\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_N]^*, \quad (17)$$

则有

$$\epsilon = Af' - G'. \quad (18)$$

我们希望得到的是在最小平方意义上偏离先验廓线最小的解。换言之，我们需要的是使二次型

$$F(f', \gamma) = (Af' - G')^*(Af' - G') + \gamma f'^* f' \quad (19)$$

达到极小值的解。这里 γ 为Lagrange乘子。由此可以求得

$$f' = (A^*A + \gamma I)A^*G', \quad (20)$$

其中 I 为单位矩阵。数值计算^[10]表明，添加了先验信息以后，反演出的解不再出现振荡，比没有添加信息的解准确得多。

现在美国气象部门使用于业务的反演方法是经验正交函数法^[7]，其思路如下：任一大气温度探空数据及大气辐射率探测数据（用辐射亮温表示）可以分别用列矩阵 t 和 t_B 表示。它们都可以以经验正交函数展开，

$$t = Ta, \quad (21)$$

$$t_B = T_B b, \quad (22)$$

其中 T 和 T_B 为经验正交函数，只需取前面十个本征矢量一般就可以解释大气温度变化率的

99%以上, 它们是分别利用全球晴空大气温度探空数据以及晴空大气辐射率的卫星探测数据, 相对于各自取样平均的偏离的数据集计算出的。 α 和 b 为展开系数。可以通过变换矩阵 D 把 b 变为 α , 利用最小方差方法及正交特性,

$$\alpha = Db = D(T_B^* T_B)^{-1} T_B^* t_B = DT_B^* t_B. \quad (23)$$

把(23)式改写成可以复盖所有测量值的形式:

$$A = DB, \quad (24)$$

按照最小二乘法由(24)式可以求出

$$D = AB^*(BB^*)^{-1}. \quad (25)$$

将(23)式代入(21)式, 最后有

$$t = \{TDT_B^*\} t_B. \quad (26)$$

在日常反演时, 如前所述, 本征矢量矩阵 T 和 T_B 是分别利用全球的晴空大气温度探空数据和晴空大气辐射率的卫星探测数据计算出的。而变换矩阵 D 则是按地区划分计算并且不断更新。它是利用某一地区前几天基本上同时同地取得的晴空探空数据的 α 系数和晴空卫星探测数据的 b 系数的数集按照(25)式计算出的。这样就可按照(26)式把在某地区取得的大气辐射率探测值 t_B 反演为大气温度廓线 t 。

经验正交函数法充分运用了全球已有的探空数据和卫星探测数据包含的信息, 比在它之前提出的方法优越, 因此自从1978年美国把TIROS-N/NOAA卫星系列投入使用之后, 一直使用经验正交函数法把由这些卫星携带的HIRS-2仪器提供的大气红外辐射率数据反演为大气温度廓线。此法毋需计算大气透过率, 从而避免了大气透过率计算带来的麻烦。但是也正由于它依赖于统计资料, 全球很多缺乏探空资料的地区(如海洋)就不容易反演准确。因此从长远看, 仍应继续发展不依赖于统计资料的物理方法。

反演方法还有叠代法^[6,11]和统计法^[12]等类型, 这里不再一一介绍。

三、星载红外探测仪器

被动式分光计按照常规的分光方式可以分

为光栅式、干涉仪式和滤光片式三大类。光栅式分光计可以提供很窄的光学通道, 可动部件少, 但是对各部件的设计、安装以及温度性能的要求非常苛刻, 入射光通量受到光谱分辨率的限制。干涉仪式分光计可以从整个光谱段取得大量丰富的信息, 如果采用新的数据处理方法^[13]可以得到很高的信噪比, 但是结构复杂, 技术要求非常高。滤光片式分光计与前两种分光计相比较, 各元部件的要求并不太苛刻, 可靠性比较好, 性能能够满足当代的要求, 不足之处是光谱分辨率的进一步提高受到限制, 通道数也难以增加太多。

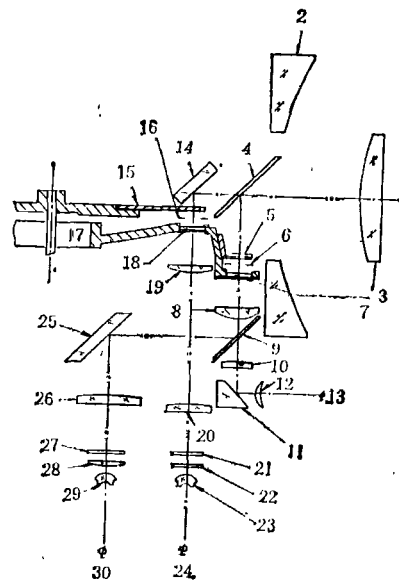


图2 HIRS-2的光路图

1. 孔径光阑, 2. 主镜, 3. 次镜, 4. 长波-短波分色镜, 5. 短波调制器, 6. 短波-可见光场光阑, 7. 短波滤光片, 8. 短波透镜 I, 9. 短波-可见光分色片, 10. 可见光透镜, 11. 可见光转折镜, 12. 可见光透镜 II, 13. 可见光探测器, 14. 长波转折镜, 15. 长波调制器, 16. 长波场光阑, 17. 滤光片轮, 18. 长波滤光片, 19. 长波透镜 I, 20. 长波透镜 II, 21. 长波真空窗口, 22. 长波辐射器窗口, 23. 长波消象差透镜, 24. 长波探测器, 25. 短波转折镜, 26. 短波透镜 II, 27. 短波真空窗口, 28. 短波辐射器窗口, 29. 短波消象差透镜, 30. 短波探测器

基于上述原因, 第一个为气象部门提供常规业务数据的是垂直温度廓线辐射计(VTPR)(滤光片式)^[14]。它从1972年起先后安装在NOAA-2, 3, 4, 5四颗卫星上, 一共工作了六

表 1 HIRS-2 的光学特性和灵敏度

通道编号	中心波数 (cm^{-1})	中心波长 (μm)	$NE\Delta N^*$ 测量值 ($\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1}$)	主要 吸收成分	权重函数顶峰 (mbar)	观测目的
1	669	14.95	2.7	CO ₂	30	温度探测: 15 μm 带通道对大气冷区温度的灵敏度优于 4.3 μm 带, 第 5—7 通道也用于计算视场中的云高和云量。
2	680	14.71	0.46	CO ₂	60	
3	690	14.49	0.53	CO ₂	100	
4	703	14.22	0.30	CO ₂	250	
5	716	13.97	0.20	CO ₂	500	
6	733	13.64	0.24	CO ₂ /H ₂ O	750	
7	749	13.35	0.14	CO ₂ /H ₂ O	900	
8	900	11.11	0.058	窗口	地表面	地表温度及测云
9	1030	9.71	0.085	O ₃	25	总 O ₃ 含量
10	1225	8.16	0.155	H ₂ O	900	水汽探测: 提供 CO ₂ 通道和窗口通道的订正; 6.7 μm 通道也用于探测薄卷云
11	1365	7.33	0.14	H ₂ O	600	
12	1488	6.72	0.19	H ₂ O	400	
13	2190	4.57	0.0057	N ₂ O	950	温度探测: 4.3 μm 带通道对大气暖区温度的灵敏度优于 15 μm 带; 短波辐射对云的灵敏度也劣于 15 μm
14	2210	4.52	0.0031	N ₂ O	850	
15	2240	4.46	0.0033	CO ₂ /N ₂ O	700	
16	2270	4.40	0.0015	CO ₂ /N ₂ O	600	
17	2360	4.24	0.0020	CO ₂	5	
18	2515	4.00	0.0023	窗口	地表面	地表温度: 对云和 H ₂ O 远没有 11 μm 窗口灵敏, 与 11 μm 窗口一起测云的污染, 还可消除太阳光的干扰
19	2660	3.76	0.00068	窗口	地表面	
20	14500	0.69	0.10% A**	窗口	云	测云: 在白天和 4.0 μm 及 11 μm 一起确定晴视场

* $NE\Delta N$ 称为噪声等效辐射率差, 反映仪器灵敏度的优劣。

** A 表示反照率

年, 直到 1978 年 10 月才被第二代业务仪器——高分辨率红外辐射探测仪 (HIRS-2)^[1] 所代替。预计 HIRS-2 将一直服务到九十年代。

HIRS-2 的光路图如图 2 所示, 各通道特性如表 1 所示。

入射光经过由扫描系统驱动的 45° 反射镜转折 90°, 再经过卡塞格林望远镜会聚到长波-短波分色片上, 以 6.4 μm 为界分成波长范围不同的二束射线, 它们分别被各自的调制器调制, 并且分别穿过长波和短波滤光片。短波光束再经过短波-可见光分色片, 把光束分解成波长小于 2 μm 可见光束和波长大于 2 μm 的短波光束。这三束光分别经过各自的中继光学系统到达被辐射致冷器冷却到 107K 的 HgCdTe 探测器 (6.7—1.5 μm) 和 InSb 探测器 (3.7—4.6 μm)

以及硅光二极管 (0.69 μm) 上。

12 块长波滤光片以及 7 块短波滤光片 (再加上一片可见光滤光片) 分别装在滤光片轮的二个同心圆周上。每隔 100ms 滤光片轮转一圈提供包括 20 个通道的一组大气探测数据, 然后扫描镜步进到下一个位置进行新的测量。每扫描一行共取得 56 组数据。扫描 37 行以后进行机内辐射校准 (费时等于扫描三行的时间)。探测器把辐射信号转换为电信号经电子学系统处理后由星载发射机传送到地面站, 进行数据预处理和反演, 最后把大气温度廓线数据提供给天气预报部门使用。

实际上 HIRS-2 与 TIROS-N/NOAA 卫星系列上的另外两只仪器即平流层探测器 (SSU) 和微波探测器 (MSU) 组成 TIROS

业务垂直探测仪 TOVS 系统^[16],从而把探测范围扩充到平流层上部,并提高了对有云地区的探测能力。

滤光片式分光计自七十年代初以来一直是美国气象业务部门正式使用的仪器。在美国同步气象卫星上也采用这种类型的仪器。预计到九十年代中期,美国将改用第三代业务性分光计。

参 考 文 献

- [1] 曾庆存, 大气红外遥测原理, 科学出版社, (1974).
 [2] F. Hagemann, *Science*, **130** (1959), 542—552.
 [3] A. R. Curtis and R. M. Goody, *Proc. Roy. Soc. A*, **236** (1956), 193—206.
 [4] 《数学手册》编写组, 数学手册, 人民教育出版社, (1979).

- [5] W. L. Smith, *Monthly Wea. Rev.*, **96** (1968), 387—396.
 [6] M. T. Chachine, *J. Atmosph. Science*, **31** (1974), 233—243.
 [7] W. L. Smith and H. M. Woolf, *J. Atm. Sci.*, **33** (1976), 1127—1140.
 [8] M. T. Chachine, *J. Atm. Sci.*, **34** (1977), 744—757.
 [9] D. L. Phillips, *J. Assoc. Comp. Mach.*, **9** (1962), 84—97.
 [10] S. Twomey, *J. Assoc. Comp. Mach.*, **10** (1963), 97—101.
 [11] 赵高祥, 科学通报, **25**(1980), 1079—1083.
 [12] 黎光青, 气象学报, **42**(1984), 475—479.
 [13] W. L. Smith et al., *J. Atm. Sci.*, **36**(1979), 566—575.
 [14] G. Falbel and D. Zink, Conf. on Infra-Red Techniques, University of Reading, 21—23, Sep, (1971), 231—255.
 [15] E. W. Koenig, Conf. Record Space Instrumentation for Atmospheric Observation (1979), IEEE Region V Annual Conference, Apr. 3—5, (1979).
 [16] A. Schwalb, NOAA T. M. NESS 95, March (1978).



(上接第356页)

比较容易实现。但标记化合物的快速合成技术则难度较大。结合我国的目前情况,我们的原子物理、生物物理、计算机图象处理、核医学、生理学、放射药物化学以及工程技术等方面,都具有较高的水平,已具备开展 PCT 研究的基础。各相关学科如能通力协作,互相渗透,可以预期 PCT 这一新的研究技术,将在我国医学的科研领域中,取得更多的成就。

本文蒙美国加州大学洛杉矶分校生物物理研究室主任 Phelps 博士,以及 Hoffmann 和 Huang 博士提供宝贵资料与指道,谨致以深切的感谢。

参 考 文 献

- [1] M. M. Ter-Pogossian et al., *Radiology*, **114** (1975), 89.
 [2] M. E. Phelps, *J. Nucl. Med.*, **16** (1975), 210.
 [3] 陈惟昌等, 生物化学与生物物理学进展, No.2(1980), 26.
 [4] M. M. Ter-Pogossian, *Semin. Nucl. Med.*, **11**(1981), 13.
 [5] E. J. Hoffmann et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-28** (1981), 99.
 [6] A. Wolf, *Semin. Nucl. Med.*, **11**(1981), 2.
 [7] M. E. Phelps et al., *J. Nucl. Med.*, **23** (1982), 6.
 [8] L. A. Shepp, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-21** (1974),

21.
 [9] E. J. Hoffmann et al., *J. Comput. Assist. Tomogr.*, **3** (1979), 299.
 [10] M. E. Phelps et al., *J. Comput. Assist. Tomogr.*, **6** (1982), 551.
 [11] S. Huang et al., *J. Cereb. Blood Flow Metab.*, **2** (1982), 99.
 [12] L. Sokoloff et al., *J. Cereb. Blood Flow Metab.*, **1** (1981), 7.
 [13] M. E. Phelps et al., *J. Cereb. Blood Flow Metab.*, **2** (1982), 113.
 [14] R. L. Grubb et al., *Stroke*, **5** (1974), 630.
 [15] C. B. Smith et al., *Trans. Am. Soc. Neurol. Chem.*, **11** (1980), 94.
 [16] J. R. Budinger et al., *Am. J. Cardiol.*, **45** (1980), 399.
 [17] M. E. Phelps et al., *Annal. Intern. Med.*, **98** (1983), 399.
 [18] J. C. Mazziotta et al., *Neurol.*, **31** (1981), 503.
 [19] D. E. Kuhl et al., *J. Cereb. Blood Flow Metab.*, **2** (1982), 163.
 [20] M. E. Phelps et al., *Neurol.*, **31** (1981), 517.
 [21] S. J. Frackowiak et al., *J. Comput. Tomogr.*, **4** (1980), 727.
 [22] J. C. Baron et al., *Eur. Neurol.*, **20**(1981), 273.
 [23] G. L. Lenzi et al., *Eur. Neurol.*, **20**(1981), 285.
 [24] J. Jr. Engels et al., *Ann. Neurol.*, **9**(1981), 215.
 [25] T. Farkas et al., *J. Cereb. Blood Flow Metab.*, **1** (1981), 496.
 [26] 袁观俊, 物理, **12-7**(1983), 410.