热红外遥感中通道间信息相关性及其对陆面温度反演的影响

陈良富 庄家礼 徐希孺
(北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871)

摘要 模拟计算了 MODIS 的 7 个通道间的信息相关性, 结果表明它们的相关系数很大. 通道间高度的信息相关是陆面温度遥感反演中精度难以提高的根本症结之一, 经主成分分析表明用于反演的 14 个独立方程中最多只能提供 5 个独立信息成分, 7 个通道只有 3 个独立信息成分. 这表明陆面温度(LST)的反演属于不确定性反演问题, 所以目前被广泛使用的确定性反演方法不可能获得稳定的高精度的陆面温度.

关键词 热红外遥感 通道信息的相关性 陆面温度反演

陆面温度是地表物理过程的重要参数, 它在气象、水文、植被生态、军事侦察及环境监测等方面都有着重要的应用价值, 故长期以来从热红外遥感数据反演陆面温度的问题为众多的地球科学家所关注. 根据热辐射传输方程, 卫星传感器接收到的热辐射亮度值由 3 部分组成, 即

$$L_i = \varepsilon_i L_{bi}(T_s)\, t_{0i} + L_{ai}^{\uparrow} + t_{0i}\int_{2\pi} f(\Omega' \rightarrow \Omega) L_{ai}^{\downarrow}(\theta') \cos\theta' \, \mathrm{d}\Omega', \qquad (1)$$

其中 L_i 为传感器接收的第 i 波段的热红外辐射亮度, $L_{bi}(T_s)$ 为地表物理温度为 T_s(单位为 K)时的 Planck 黑体辐射亮度, ε_i 为第 i 波段地表比辐射率, t_{0i} 为第 i 波段从地面到传感器的大气透过率, $L_{ai}^{\uparrow}$ 为第 i 波段大气上行辐射, $L_{ai}^{\downarrow}(\theta')$ 为天顶角时第 i 波段大气下行辐射, $f(\Omega' \rightarrow \Omega)$ 为地表双向反射分布函数, $\int_{2\pi}$ 为积分符号代表半球积分, $\mathrm{d}\Omega'$ 为微分立体角. 方程(1)中第 1 项是地表热辐射经大气削弱后被传感器接收的热辐射亮度, 第 2 项为大气上行辐射亮度, 第 3 项大气下行辐射经地表反射后再被大气削弱最终被传感器接收的辐射亮度. 要从传感器的辐射亮度值 L_i 中反演出陆面温度 T_s 必须要解决以下几个难点: ( ) 地表的比辐射率 ε_i, 它既依赖于地表的组成成分又与物理状态(如含水量、粗糙度)和视角等因素有关, 且象元尺度的地表比辐射率难以预先确定; ( ) 由于 ε_i 明显小于 1, 除了大气上行辐射项 $L_{ai}^{\uparrow}$ 以外, 大气下行辐射效应项(式(1)中的第 3 项)也成了大气修正的另一项内容. 然而大气下行辐射效应的精确修正又依赖于已知地表比辐射率, 要得到地表比辐射率又要确知地表辐射亮度, 这样就构成了一个死循环[1]; ( ) 由于 N 个通道对应 N 个热辐射传输方程, 但其中有 N 个未知的比辐射率 $\varepsilon_i(i = 1, 2, \cdots, N)$ 和一个陆面温度 T_s, 所以未知量多于方程数, 方程组不完备, 从而构成了陆面温度反演的不确定性. 为了解决不确定的陆面温度反演问题, 人们通常通过各种假设来排除不确定性, 使方程组完备, 从而获得某种确定性解.

早期将海面温度反演的“劈窗法”推广应用于陆面温度反演, 提出了“局地劈窗法”[2, 3], 然而该方法以目标通道比辐射率已知为前提, 并要求比辐射率的精度必须高于 0.005, 显然这是不切实际的. 随后根据不同温度下比辐射率保持不变这一事实提出了“双温度法”, 在“白天”和“黑夜”2 个不同的温度条件下获取观测数据[4]. 这种方法不需要事先知道某一通道的比辐

射率, 但比辐射率暂时不变的假定, 对岩石和干土壤是有效的, 而对含水量发生变化的目标则无效. 即将升空的传感器 MODIS 及其陆面温度产品, 体现了迄今为止人们为寻求精度更高更稳定的陆面温度反演方法所作的最新努力, 它要求同步反演三类参数: 陆面温度、通道比辐射率及必要的大气参数[5]. 换言之, 它把决定 8~ 14 μm 大气窗口热红外辐射亮度测值的所有参数都列入被反演的未知数范围内, 这样除了需要考虑该反演方法对测量误差的敏感度外, 就没有任何其他不确定因素需要计及, 似乎这样的反演方法更具普遍适用性, 更高的精度及更好的稳定性. 如果把每个通道所对应的辐射传输方程视为彼此独立的方程, 每一个通道包含一个未知比辐射率, N 个通道有 N 个未知比辐射率, 加上一个共同的未知数陆面温度和 2 个大气参数(如果把必要的大气参数限定在气柱总水汽含量与贴地层大气温度 2 个未知参数的范围内). 那么 N 个独立方程对应 $N+3$ 个未知数, 显然该方程组是不完备的. 为了使独立方程数等于或大于未知数的数目而同样采用了双温度方法, 即 N 通道比辐射率不变的情况下, 大气参数和地表温度未知数变成了 6 个, 此时要满足方程组完备的条件便是 $2N \geqslant N+2\times 3$, 于是 $N \geqslant 6$. 就现在的技术条件而言在 8~ 14 μm 窗区内要划分出 6 个通道尚有困难, 因此必须加入 3.5~ 4 μm 的中红外窗区的信息, MODIS 的 3 个中红外通道就这样加入了陆面温度的反演行列. 由于在中红外波段太阳辐射的地表反射与地表发射同处于一个数量级, 白天太阳辐射经地表反射后对传感器辐射亮度测值的贡献就必须予以考虑. 从本质上讲地表对太阳辐射的反射是非 Lambertian 体的, 在一级近似条件下假定 3 个中红外通道可用一个参数 α 去描述非 Lambertian 体反射特性

$$\alpha = \frac{\pi f(\Omega' \rightarrow \Omega)}{r},$$

其中 r 为地表 Lamlartian 体假设时的反射率. 这样要使方程组完备的条件变为: $2N \geqslant N+2\times 3+1$, 于是要求通道数 $N \geqslant 7$, 这就是 MODIS 设置 7 个通道反演 LST 的由来. 该方法最不确定的地方有 3 处: ( ) 假定 2 次测量间比辐射率不变; ( ) 中红外通道的引入, 表面上满足了方程组完备的要求, 但同时由于太阳辐射影响的加入使问题更加复杂化; ( ) 由 14 个方程求解 14 个未知数. 反演方法过于复杂. 为此不得不求助于线性近似、统计方法等简化手段. 使该方法与原设计愿望背道而驰. 作者认为问题的症结还不在于此, 而在于通道间信息的高度相关性. 迄今为止, 所有的陆面温度反演方法都属于确定性反演方法, 不论其具体算法有何不同, 它都基于这样一个前提, N 个独立方程求解 N 个未知数. 那么"独立"的确切含义是什么? 是相关系数或叫相似性. 当 2 个方程之间的相关系数为"0"时, 它们彼此完全独立, 而当它们之间的相关系数为"1"时, 它们为完全不独立的同一方程(或者全等方程). 虽然热红外通道间既不"同一"也不完全"独立", 但根据我们的模拟计算结果表明, 通道间的相关性极高, 其相关系数大多在 0.9 以上. 这表明不同通道所能提供的"独立"信息是十分有限的. 如果依据如此高度相关的"独立方程"直接求解, 其后果是反演结果对测量误差的极度敏感性, 使解不稳定, 且独立方程个数及变量数越多, 则解的不稳定性越大.

1 MODIS 的数值模拟及通道信息相关性分析

由于 MODIS 加入了中红外通道, 则热红外传输方程变为[5]

$$L_j = t_{1j}\varepsilon L_{bj}(T_s) + L_{aj}^{\uparrow} + L_{sj}^{\uparrow} + \frac{1-\varepsilon}{\pi}[t_{2j}\alpha\mu_0 E_{0j} + t_{3j}E_{dj} + t_{4j}E_{ad,j}], \qquad (2)$$

其中 L_j 代表 j 通道传感器所测得的辐射亮度, $L_{bj}(T_s)$ 为温度 T_s 所对应的黑体辐射亮度, ξ_j 为 j 通道的平均比辐射率, $t_{ij}(i=1, 2, 3, 4)$ 为对应项的大气透过率, $L_{aj}^{\uparrow}$ 为大气上行辐射亮度, $L_{sj}^{\uparrow}$ 为气溶胶对太阳直接辐射的散射所构成的路径辐射亮度, E_{0j} 为太阳直接辐射在大气上界面的辐射通亮密度, μ_0 为 $\cos\theta_0$, θ_0 为太阳天顶角, α 为地表非 Lambertian 体反射的纠正因子, E_{dj} 为大气下行辐射在地表构成的辐射通亮密度, $E_{ad,j}$ 为气溶胶对太阳直接辐射之散射在地表构成的辐射通亮密度. 作者用典型地物的比辐射率、典型的地表温度及大气条件对 MODIS 的 3 个中红外通道(20, 22, 23)及 4 个热红外通道(29, 31, 32, 33)的辐射亮度测值进行了数值模拟, 模拟计算中有关问题分述如下:

(1) 选择 5 个美国大气模式(热带大气模式、中纬度夏季大气模式、中纬度冬季大气模式、副极区夏季大气模式、副极区冬季大气模式)为代表性背景条件, 应用 Lowtran7 分别计算了不同大气模式条件下每个通道的大气下行辐射亮度、大气上行辐射亮度及大气透过率等数值.

(2) 在大气下行辐射效应的计算中, 把半球空间的大气下行辐射按真实的非各向同性分布进行计算.

(3) 关于气溶胶散射系数的计算, 根据如下公式进行[6]:

$$K_{s\lambda}(\text{气溶胶}) = \left| \frac{3.912}{R_m(\lambda_0)} - K_{s\lambda}(\text{分子}) \right| \left| \frac{\lambda_0}{\lambda} \right|^{\nu-2},$$

其中 $K_{s\lambda}$(气溶胶)为近地层气溶胶散射系数, $R_m(\lambda_0)$ 是大气能见距离, 本次实验取 23 km, $K_{s\lambda}$(分子)是近地层分子散射系数, λ 为波长, λ_0 为 0.5 μm, ν 为气溶胶尺度谱参数, 本次模拟取 $\nu=4$. 气溶胶粒子浓度随高度分布取指数衰减规律, 故其散射系数随高度满足如下公式:

$$K_s(Z) = K_s(0) \cdot \exp\left| -\frac{Z}{H_p} \right|,$$

其中 $K_s(0)$ 是近地层气溶胶散射系数, H_p 为气溶胶标高参数, 本次模拟取 1.2 km.

(4) 地表对太阳直接辐射之反射, 本文采用了文献[5]所提供的方法.

(5) 本文采用了 4 种典型地物: 树叶、粘土、细沙和粗沙, 它们对应 MODIS 7 个通道的比辐射率值取自文献[7]中图 1 的比辐射率值, 并将波段平均比辐射率值列于表 1. 地面温度选取大气贴地层温度的 ±10 K, 以代表昼/夜不同状况, 数值列于表 2.

表 1 MODIS 7 个波段 4 种地物的波段平均比辐射率

波段	波段范围/μm	树叶	粘土	细沙	粗沙
20	3.66~3.84	0.965	0.912	0.875	0.75
22	3.929~3.989	0.975	0.925	0.895	0.80
23	4.02~4.08	0.975	0.940	0.915	0.85
29	8.4~8.7	0.96	0.908	0.967	0.58
31	10.78~11.28	0.95	0.986	0.965	0.96
32	11.77~12.27	0.952	0.98	0.947	0.927
33	13.185~13.485	0.967	0.99	0.945	0.952

表 2 模拟计算中的地表温度范围

大气模式	热带大气	中纬度夏季	中纬度冬季	副极带夏季	副极带冬季
边界气温/K	299.2	294.2	272.1	287.2	257.1
地表温度/K	289~309	284~304	262~282	277~297	247~267

将模拟结果构成资料矩阵| D| ,| D| 矩阵的横向代表 MODIS 的 7 个波段. 如果把每一个波段所对应的昼/ 夜予以区别, 则共有 14 个变量. | D| 矩阵的纵向代表 5 个大气模式, 每个模式包含 4 个典型地物(4 种比辐射率波谱) , 共计 20 个变量. 所以, | D| 为一个 20 × 14 的多维矩阵. 如果把| D| 矩阵的每列看成是 20 维空间中的一个矢量, 那么 MODIS 通道间的相关系数就是求取 14 个矢量间的夹角余弦. 相关系数计算结果列于表 3.

表 3 MODIS 各通道的信息相关系数

Ch		20		22		23		29		31		32		33	
		T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
20	T1	1.0000													
	T2	0.9294	1.0000												
22	T1	0.9981	0.9369	1.0000											
	T2	0.9711	0.9813	0.9801	1.0000										
23	T1	0.9953	0.9495	0.9986	0.9882	1.0000									
	T2	0.9753	0.9687	0.9849	0.9983	0.9919	1.0000								
29	T1	0.9404	0.9005	0.9564	0.9624	0.9628	0.9747	1.0000							
	T2	0.9036	0.8328	0.9225	0.9158	0.9252	0.9344	0.9883	1.0000						
31	T1	0.9479	0.9566	0.9629	0.9898	0.9740	0.9934	0.9829	0.9463	1.0000					
	T2	0.9116	0.9410	0.9315	0.9731	0.9465	0.9773	0.9783	0.9444	0.9946	1.0000				
32	T1	0.9429	0.9492	0.9588	0.9858	0.9702	0.9907	0.9854	0.9512	0.9995	0.9960	1.0000			
	T2	0.8992	0.9238	0.9209	0.9624	0.9361	0.9688	0.9793	0.9501	0.9901	0.9987	0.9930	1.0000		
33	T1	0.9239	0.9471	0.9421	0.9793	0.9560	0.9834	0.9808	0.9450	0.9968	0.9988	0.9977	0.9966	1.0000	
	T2	0.8961	0.9316	0.9177	0.9640	0.9340	0.9688	0.9742	0.9408	0.9895	0.9985	0.9918	0.9988	0.9975	1.0000

表 3 中, T_1 与 T_2 分别代表昼/ 夜, Ch 代表通道, 表中的数值代表通道间的相关系数. 结果表明: ( ) MODIS 各通道信息间的相关性都很大, 除 3 个系数在 0.9 以下外, 其余各通道信息之间的相关系数均在 0.91 以上; ( ) 各通道间相关程度不同. 中红外通道间及热红外通道间的信息相关普遍较高, 尤其是热红外中第 31, 32 和 33 通道间的相关系数在 0.99 以上; 中红外和热红外通道之间的相关程度中, 第 20 通道与热红外的 4 个通道间的相关程最低度, 3 个相关系数小于 0.90 的都在这一通道, 总体上, 越接近热红外通道, 其与热红外通道间的相关性越大, 如第 23 通道要比第 22 通道与热红外通道间的相关程度大; ( ) 地表温度不同时, 通道间信息的相关程度有差异.

虽然严格的辐射传输方程是一个非线性方程, 但作为一级近似它可被线性化[5]. 因此我们可以直接应用主成分分析方法(PCA) 去求取数据矩阵| D| 的本征值与本征矢量, 以及应用 IND 指数求取有效主成分数, 所得结果列于表 4~ 6.

根据有效主成分判断原理[8], 对应| D| 的 IND 值在第 5 到第 6 处发生了由降到升的转折, 这表明 MODIS14 个“独立”方程最多只能提供 5 个独立成分信息, 远小于 14 个独立成分之要求.

为了弄清 MODIS 7 个通道间的信息相关性, 可以构成新的资料矩阵| $D|_{new}$ 它的纵向维数为 5 × 4 × 2(大气模式 × 比辐射率类型 × 昼/ 夜 T_s) , 则| $D|_{new}$ 便是一个 40 × 7 维矩阵, 同样求取其通道间的相关系数、本征值、本征矢量及 IND 值, 由于| $D|_{new}$ 与| D| 的相关系数, 本征矢量没有本质区别, 为节省篇幅不在此列出, 其本征值 λ_i 与 IND 值分别列于表 7 与表 8. 数据表明 7 个通道实际上最多只能提供 3 个独立主成分信息.

表 4 |D| 的本征值[a)]

λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}
1510935.5	26744.44	1194.795	340.6199	78.9255	6.97695	5.5890	3.4060	1.5005	0.2996	0.2144	0.0018	0.0013	0.0009

a) 表中 λ_i 代表第 i 个本征值

表 5 |D| 的本征矢量[a)]

$\overline{Q}_1$	$\overline{Q}_2$	$\overline{Q}_3$	$\overline{Q}_4$	$\overline{Q}_5$	$\overline{Q}_6$	$\overline{Q}_7$	$\overline{Q}_8$	$\overline{Q}_9$	$\overline{Q}_{10}$	$\overline{Q}_{11}$	$\overline{Q}_{12}$	$\overline{Q}_{13}$	$\overline{Q}_{14}$
0.0733	−0.1403	0.1215	−0.4288	0.0252	−0.1070	0.2914	−0.1683	−0.1940	−0.0415	0.5389	−0.5139	0.2307	−0.0623
0.2005	−0.1746	−0.6580	−0.0340	0.5195	−0.1432	0.2484	−0.0643	0.1420	−0.1989	−0.2088	−0.1459	−0.1168	0.0265
0.1286	−0.2303	0.2184	−0.5089	0.0365	−0.1479	−0.3336	−0.1442	0.0794	0.3725	−0.4440	−0.2089	−0.2585	0.1260
0.3231	−0.4397	−0.2112	0.1489	0.0871	−0.0730	−0.2961	0.0593	−0.0375	0.4797	0.4060	0.3134	0.1749	−0.0790
0.1600	−0.2675	0.1856	−0.4394	−0.0907	−0.0923	0.2811	−0.0007	0.0719	−0.3674	−0.0306	0.6577	−0.0058	−0.0758
0.3490	−0.5120	0.0919	0.2692	−0.2703	0.4564	−0.0946	−0.0617	−0.0790	−0.3663	−0.1588	−0.2691	−0.0004	0.0553
0.1441	−0.0307	0.2986	0.2125	0.1808	0.2593	0.6598	−0.1318	0.0809	0.4885	−0.1935	0.0490	0.0707	0.0351
0.1891	0.0386	0.5571	0.2248	0.6528	−0.1822	−0.2174	0.1217	−0.0049	−0.2648	0.0917	−0.0252	−0.0312	−0.0167
0.2841	0.0538	0.0039	0.0514	−0.2005	−0.3657	0.1257	0.5046	−0.2499	0.05419	−0.3396	−0.1562	0.2163	−0.4663
0.3552	0.2478	−0.0560	0.1045	−0.0967	−0.2308	0.0491	−0.2907	−0.6499	−0.0130	−0.0292	0.1429	−0.1565	0.42489
0.3208	0.0903	0.04578	0.0790	0.2827	−0.2665	0.1356	0.3368	0.5293	−0.0023	0.2099	−0.1303	−0.1478	0.48463
0.3843	0.3184	0.00661	0.0975	−0.1591	−0.1092	−0.1124	−0.5930	0.3659	−0.0489	0.0298	−0.0082	0.0149	−0.4499
0.2846	0.2567	−0.0642	−0.2207	0.0722	0.4555	0.01369	0.2956	−0.1189	0.0768	0.2327	0.0053	−0.5975	−0.2624
0.3019	0.3573	−0.0899	−0.3076	0.1429	0.3823	−0.1853	0.1256	0.0603	−0.0223	−0.1293	0.0527	0.6159	0.2425

a) 表中 Q_i 代表第 i 个本征矢量

表 6 |D| 主成分所对应的 IND($\times 10^{-3}$) 值

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
61.817	18.111	11.655	6.9619	3.9051	4.1025	4.0233	3.6172	2.9244	3.3863	2.0544	1.8465	6.8230

表 7 $|D|_{new}$ 的本征值

λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
1480238.45	56924.0981	1475.0437	497.1286	157.2412	17.0989	3.2468

表 8 $|D|_{new}$ 的主成分所对应的 IND 值

1	2	3	4	5	6
0.43578	0.13096	0.12777	0.13286	0.12608	0.28490

2 结论与讨论

(1) 本文的分析表明, 热红外遥感的通道信息具有极高的相关性, 这种高度相关性来自于: ( ) 各通道的物理过程十分相似; ( ) 不同通道间地物的比辐射率差异、大气效应的差异, 以及地表温度差异都不大. 高度相关性导致有效独立成分个数始终小于通道数. 换言之, 不可能获得足够的独立信息量去满足确定性反演的要求, 即使增加通道数也无济于事. 因此, 陆面温度(LST) 的反演问题本质上是一个不确定性反演问题, 不确定性反演与确定性反演有本质上的区别, 用确定性方法去反演一个本质上为不确定性的问题, 不可能获得稳定的高精度解. 于是改变目前流行的 LST 的反演策略思想是势在必行的事.

(2) 从一般性的规律出发彻底理解不确定反演问题是地球科学工作者迫切需要解决的新课题, 因为地球科学中的反演问题几乎都属于这一类型, Bayes 原理[9] 与人工神经元网络方法[10] 都可能为解决这一类问题提供帮助.

如何向《科学通报》投稿

1 什么样的文章投《科学通报》

《科学通报》主要报道有重大影响和重要意义的自然科学基础理论和应用研究成果, 强调成果的新闻性和文章的可读性.

1.1 新闻性

《科学通报》报道自然科学基础理论研究热点的最新成果; 讨论影响自然科学研究进程的热门话题; 评述重要研究领域的最新进展; 介绍对自然科学基础理论和应用研究有重要影响的国家科技政策的重大调整, 等等. 总之, 《科学通报》着重报道科学家们普遍关心的、有重要科学意义的研究热点.

1.2 可读性

可读性涉及两个方面:

(1) 研究成果. 一项研究成果或发现既对本研究领域有重要的影响和意义, 同时也对相关、相近领域有一定的影响, 能引起不同研究领域的科学家的广泛关注和兴趣, 只有这样的研究成果或发现才适合在《科学通报》上发表.

(2) 写作风格. 文章应对具有不同研究背景和知识结构的"大同行"和"非同行"都有很高的可读性.

根据上述方针, 《科学通报》的用稿原则如下:

(ⅳ) 是自然科学基础理论或应用研究的课题.

(㈦) 有重要科学背景的课题, 或是国际研究热点课题.

(㈣) 有创新(新的方法、新的思路、新的概念、新的交叉学科或新的发现等), 同时有重要意义(对本研究领域或/及相关领域有重大的促进作用, 或有可能促成新的交叉学科生长点, 或

致谢 本工作为"攀登"计划资助(编号: 95-预-38)项目.

参 考 文 献

1 Xu Xiru, Liu Qinhuo, Chen Jiayi. Synchronous retrieval of land surface temperature and emissivity. Science in China, Series D, 1998, 41(6): 658~ 668
2 Becker F, Zhaoliang Li. Towards a local split-window method over land surfaces. Int J Remote Sens, 1990, 11(3): 369~ 393
3 Wan Zhengming, Dozier J. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(4): 892~ 905
4 Watson K. Two-temperature method for measuring emissivity. Remote Sens Environ, 1992, 42: 117~ 122
5 Wan Zhenming, Zhao-liang Li. A physics- based algorithm for retrieving land surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. IEEE Trans on Geosci and Remote Sensing, 1997, 35(4): 986~ 996
6 周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学(上, 下册). 北京: 气象出版社, 1991
7 Wan Zhengming, Dozier J. Land-surface temperature measurement from apace: physical principkes and inverse modeling. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1989, 27(3): 268~ 278
8 Malinowski E R, Howery D G. Factor Analysis in Chemistry. New York: Wiley Interscience Publication, 1980
9 Albert Tarantola. Inverse problem theory-methods for data fitting and model parameter estimation. New York: Elseviek Science Publishing Company, 1987
10 金亚秋, 刘长龙. 人工神经网络模型反演植被生物量参数. 遥感学报, 1997, 1(2): 83~ 87

(1998_08_28 收稿, 1999-03-05 收修改稿)