

# 中国西部 SMMR 积雪图的修正<sup>①</sup>

李培基 曹梅盛

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

A. T. C. Chang

(Hydrological Sciences Branch, NASA Goddard Space Flight Center, U.S.A.)

D. A. Robinson

(Department of Geography, Rutgers University, New Jersey, U.S.A.)

**提 要** 在分析了我国西部 SMMR 积雪深度与积雪面积观测存在某些问题的基础上, 通过与地面气象台站积雪深度观测记录, DMSP 和 NOAA 卫星遥感积雪观测结果的详细对比, 阐明了我国西部 SMMR 积雪观测结果的误差。对 NASA 雪深转换公式进行了大气厚度订正和积雪面积修正。订正后的 SMMR 积雪资料精度显著提高, 具备准确表现我国西部积雪年内分配与年际变化的能力。

**关键词** 积雪被动微波遥感 积雪资料系列间的对比 大气效应 雪深转换公式修正

## 1 中国西部 SMMR 积雪图存在的问题

积雪数量和积雪面积的变化是影响我国西部, 尤其是青藏高原辐射热力状况的关键气候因子, 其动力过程在陆地-大气-海洋相互作用中有着重要影响, 与我国大范围旱涝灾害存在着密切的联系。然而, 直到今天, 要想搞清我国西部积雪的变化仍然是向雪冰科学界的挑战。传统的地面积雪测量方法在解决大范围山地积雪随高度分布以及荒无人烟地区积雪分布的问题上显得力不从心, 只有卫星遥感方法能为这些地区积雪监测带来希望。目前, SMMR 被动微波遥感是我国西部积雪测量最理想的手段, 与可见光积雪遥感相比, 它不但可以排除云的干扰, 而且能测量积雪深度或者积雪水贮量。其观测系列已达 10 年(1978—1987 年), 并且还在继续观测(SMMI)(Weaver *et al.*, 1987)。但是, 有积雪覆盖地表的微波辐射由雪层微波辐射和土壤下垫面微波辐射两部分组成。这两部分微波辐射又都被雪层的吸收和散射以及积雪与空气和土壤之间界面对微波的传输和反射所制约着。这样, 微波辐射强度不但与雪层物理温度、密度、雪晶粒径、雪层含水量、雪深、积雪水当量、雪层结构等有关, 而且与土壤类型、土壤湿度、植被状况以及大气厚度成分组成有关。因此 NASA 给出的单一的 SMMR 北半球雪深转换公式很

① 本文于1992年1月10日收到, 6月5日改回; 为中美1989—1990年国家自然科学基金合作项目研究总结的一部分, 编号分别为 4880019 和 87-13878, 由中方课题负责人执笔。

难做到放之四海而皆准。事实上, 根据该转换公式绘制的全球积雪图的精度在中国西部就受到了挑战, 应用也受到限制。

具体地说, Chang (1986)建立的 SMMR 雪深转换公式:

$$SD = 1.59(T_{18H} - T_{37H}) \quad (1)$$

式中:  $SD$  为积雪深度(cm);  $T_{18H}$ ,  $T_{37H}$  分别为在  $18\text{GHz}$  和  $37\text{GHz}$  频率下测量的亮度温度。是在低海拔湿润气候地区进行检验的, 例如美国大草原, 加拿大高平原, 阿拉斯加和原苏联中部地区。大气成分对亮度温度的影响曾忽略不计。中国西部为高寒而干旱的极大陆性气候地区, 大气厚度成为亮度温度重要影响因子。该转换公式适用于积雪深度适中, 积雪分布均匀的连续积雪地区。中国西部恰恰相反, 积雪分布很不均匀, 大部分低地盆地积雪很薄, 不连续, 持续时间短(Li Peiji, 1987)。由于浅雪层给出的被动微波信号很微弱, 使得 SMMR 对它的探测很困难, 分辨率低。实际上被动微波传感器还无法探测小于  $5\text{cm}$  厚雪层的存在(Chang *et al.*, 1990)。而中国西部除山区与北疆地区之外, 其它地区雪层都很薄, 广大的荒漠戈壁地区雪深都小于  $5\text{cm}$ (李培基, 1988)。诚然, 这些地区积雪贮量微不足道。

因此要想利用 SMMR 积雪图研究中国西部积雪, 必须与其它观测资料进行对比, 对 NASASMMR 雪深转换公式进行大气厚度订正。

## 2 SMMR 积雪图与 DMSP 积雪图和地面 气象台站记录的对比

SMMR 用于积雪观测的  $37\text{GHz}$  空间分辨率为  $25\text{km}$ 。由其亮度温度观测结果转换和绘制的世界积雪深度图是  $1/2^\circ \times 1/2^\circ$  经纬网格数字化积雪图。世界积雪图每 6 天一幅。我们讨论的地区为  $70-100^\circ\text{E}$  和  $25-50^\circ\text{N}$ , 中国境内共有 1568 个网格。它们是连续 3 天扫描结果的拼凑(Foster *et al.*, 1987)。

美国国防气象卫星(DMSP)可见光影像图地面分辨率为  $2.8\text{km}$  (Robinson *et al.*, 1984)。我们用  $1^\circ \times 1^\circ$  经纬网格经判读按 4 级积雪覆盖度绘制中国西部积雪状况图(图 1), 其中, (1) $<11\%$ ; (2) $11-30\%$ ; (3) $31-80\%$ ; (4) $>81\%$ , 共绘制 1978—1987 年 11 至 3 月各月中旬积雪状况图 50 余幅, 用于进行对比分析。

自 1957 年以来中国西部地面气象台站网有了很大发展。但是西藏地区、高山地区和沙漠地区台站数目仍远远不足, 地理分布不均匀, 台站位置代表性欠佳。尽管如此, 它们, 或者把它们与可见光卫星遥感观测结果配合起来, 仍可对微波观测进行检验。我们把中国西部( $100^\circ\text{E}$  以西)几乎全部气象台站共 175 个, 1978—1980 年逐日积雪深度用来进行对比研究。

表 1 给出了 1978—1980 年中国西部 32 幅 SMMR 积雪图, 平均积雪深度和积雪面积与相应观测日期 175 个地面台站平均积雪深度和积雪面积观测结果的比较。目的是检验整个中国西部地区 SMMR 观测的准确性。可以看出, 积雪深度观测结果两者比较接

近。考虑到大多数地面台站位于海拔相对较低的地点, SMMR 测得的积雪深度略大于台站观测的平均雪深是合理的。但是在春季消融出现时, SMMR 测量的积雪深度误差过大。利用单个地面台站逐点检验结果表明, 在浅雪层地区, SMMR 给出的积雪深度

表 1 SMMR 给出的中国西部积雪面积、平均雪深、积雪量  
与 175 个气象台站观测结果的比较

Table 1 Comparison of SMMR derived snow information with 175 station  
data over western China

时 间 (年.月.日)	SMMR 比地面台站			SMMR 漏测率 (%)
	积 雪 面 积	平均积雪深度	积 雪 量	
1978—1979 年				
11.29—12. 3	2.19	2.30	5.1	16.4
12. 5—12. 9	2.59	1.98	5.1	18.4
12.17—12.21	3.13	1.92	6.0	16.7
12.29— 1. 2	3.06	1.39	4.3	14.2
1. 4— 1. 8	3.56	1.43	5.1	15.3
1.10— 1.14	2.00	1.39	2.7	15.4
1.28— 2. 1	1.57	1.34	2.2	13.3
2. 3— 2. 7	2.16	1.17	2.5	16.1
2. 9— 2.13	2.16	1.44	3.1	18.2
2.27— 3. 3	2.07	1.78	3.8	20.5
3. 5— 3. 9	2.89	1.44	4.2	20.6
3.11— 3.15	2.30	1.71	4.9	19.4
3.23— 3.27	5.53	1.55	8.7	27.7
3.29— 4. 2	5.68	2.69	17.4	27.4
1979—1980 年				
11.12—11.16	2.80	1.56	4.4	21.4
11.18—11.22	2.70	1.29	3.5	20.5
11.30—12. 4	2.35	1.63	3.8	19.8
12.12—12.16	2.39	1.84	4.5	17.8
12.18—12.22	1.77	2.00	3.5	18.1
12.30— 1. 3	1.66	1.66	2.7	14.8
1. 5— 1. 9	2.04	1.56	3.2	11.5
1.11— 1.15	1.73	1.48	2.6	13.5
1.17— 1.21	2.07	1.19	2.5	14.3
1.23— 1.27	2.07	1.25	2.6	17.4
1.29— 2. 2	1.31	1.76	2.4	16.0
2.10— 2.14	1.84	1.41	2.6	18.1
2.28— 3. 3	1.55	1.73	2.7	21.3
3.11— 3.15	1.98	1.51	3.0	20.9
3.17— 3.21	2.38	1.45	3.6	21.7
3.23— 3.27	2.49	2.75	6.8	24.6
3.29— 4. 2	3.25	4.09	13.4	24.4
4. 4— 4. 8	4.62	5.04	22.0	31.8

偏大, 在深雪地区偏小。自然, 由于积雪面积观测误差引起的雪深观测误差也存在。假如不能准确地将无积雪地区与浅层积雪分辨开, 势必使平均积雪深度被夸大。与积雪深度观测结果相比, SMMR 测量的积雪面积却远大于地面台站观测结果。特别是在积雪覆盖度不高的月份, 例如 11, 3 和 4 月份。这表明积雪层愈薄, 积雪愈不连续, 面积观测误差愈大。在斑状积雪分布地区, SMMR 不能很有效地把积雪区与无积雪区分开来, 把无积雪地面误认为积雪覆盖了, 过高地估计了积雪面积。

图 1 给出了有代表性的 SMMR 积雪图与 DMSP 积雪图以及 175 个地面气象台站积雪深度观测结果的比较。从两者的不一致性可以看出, SMMR 测量的积雪面积偏大。这和它测量的北半球积雪面积较 NOAA 积雪图为大恰恰相反。Chang 等(1987a)用

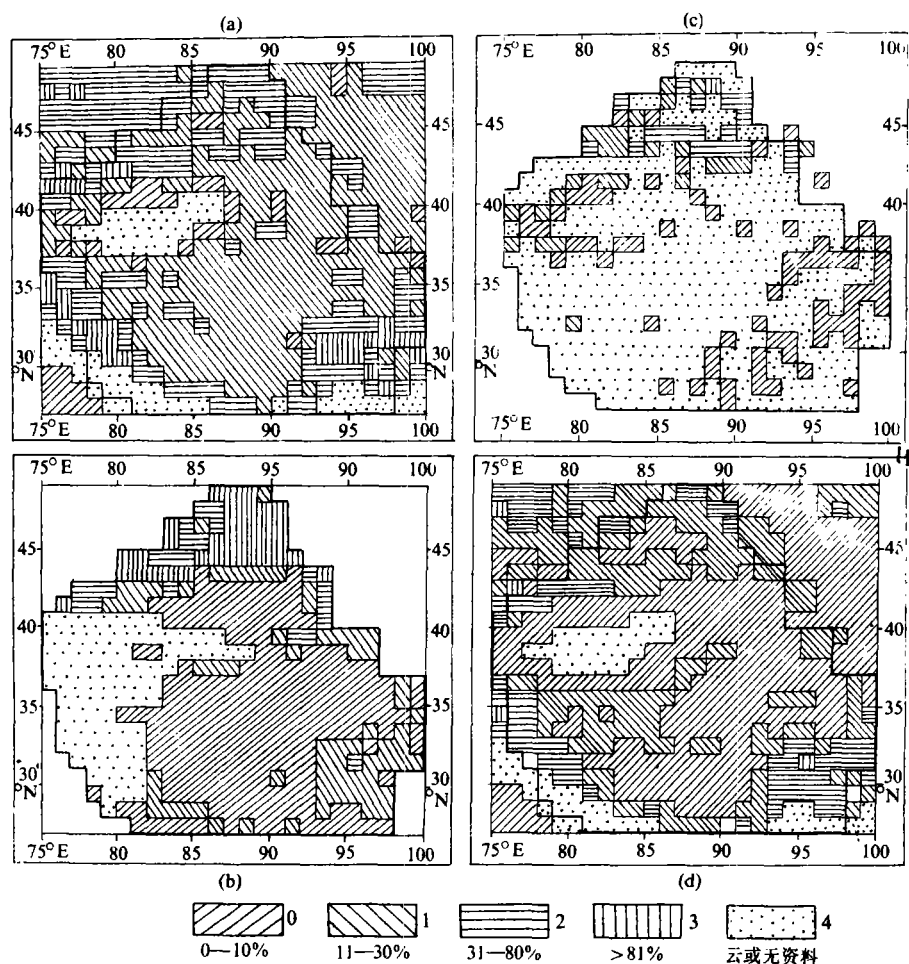


图 1 中国西部 SMMR 积雪图与 DMSP 积雪图以及地面台站积雪深度观测结果的比较

(a) 1979.1.10—14 中国西部 SMMR 积雪图; (b) 1979.1.14 中国西部 DMSP 积雪图;

(c) 1979.1.14 中国西部 175 个地面气象台站积雪深度测量结果;

(d) 修正过的 1979.1.10—14 SMMR 积雪图

Fig. 1 Comparison of SMMR derived snow chart using Eq.(1) versus DMSP imagery data and 175 station snow depth data

SMMR 无法测得 < 5 cm 积雪存在以及 SMMR 空间分辨率较 NOAA 甚高分辨率辐射仪的空间分辨率低得多来解释。显然, 上述解释对中国西部是无法自圆其说的。

表 2 列出了 15 幅 SMMR 积雪图与 DMSP 积雪图对比结果。也同样表明 SMMR

表 2 中国西部不同地形条件下 SMMR 积雪面积与 DMSP 积雪面积的比较

Table 2 Differences in percentage of snow cover area between SMMR and DMSP  
for different physiographic regions in western China

时 间 (年.月)	SMMR 减 DMSP (积雪面积%)				
	青藏高原	高 山	低 山	丘 陵	盆 地
1978.11	20.6	10.8	-24.1	0.0	3.7
1979.11	63.7	59.7	3.1	-14.0	-1.5
1984.11	24.8	7.0	-1.2	7.2	-7.1
1985.11	12.4	-3.8	-3.3	11.5	7.9
1986.11	19.6	10.3	-3.7	-11.5	-2.4
1979.1	64.0	46.7	3.7	3.9	1.2
1980.1	52.7	41.7	-6.7	12.2	0.7
1985.1	19.8	15.3	5.8	13.1	-15.3
1986.1	10.5	-2.8	-9.6	12.0	11.3
1987.1	27.3	15.7	13.0	-26.9	9.9
1979.3	30.4	34.8	9.0	19.2	8.8
1980.3	56.5	34.7	-6.6	29.2	6.2
1985.3	26.3	33.0	-6.9	7.7	-9.8
1986.3	21.9	0.0	-15.3	14.2	10.6
1987.3	24.0	2.5	-24.1	18.0	-6.8
平 均	31.6	20.4	-4.1	6.4	1.2

测得的中国西部积雪面积偏大。并且在不同地形条件下, 面积观测误差不同。以青藏高原和高山地区最大, 低山丘陵和盆地地区较小。

### 3 SMMR 雪深转换公式的修正

SMMR 多通道双极化微波扫描辐射仪在 6.6, 10.7, 18.0, 21.0 和 37GHz 频率下测量地表微波热辐射。干雪晶对微波的散射作用是微波积雪测量的物理基础。干雪晶对微波的散射与吸收作用与波长有关, 波长与雪晶大小相近时(< 1 cm), 散射作用占主导地位; 波长远大于雪晶粒径时(> 5 cm), 则以吸收作用为主。当微波频率在 20GHz 以上时, 干雪晶散射作用很强, 以致引起亮度温度, 即雪层微波热辐射平衡温度的降低。因此亮度温度被用来作为量测积雪深度, 或积雪水当量的手段。

为了把亮度温度转换成积雪深度, 必须求出不同雪深亮度温度与无积雪地面亮度温度之差(Hallikainen *et al.*, 1986)。

$$\Delta T(h_i) = T(h_i) - T(h = 0) \quad (2)$$

式中:  $T$  为亮度温度;  $h$  为积雪深度。雪层亮度温度可以是在单一频率下的, 不过为了消除积雪和土壤物理温度的影响, 采用两种频率下亮度温度之差, 可进一步提高积雪深度转换的精度。

$$\Delta T(h_i) = [T_{18H}(h_i) - T_{37H}(h_i)] - [T_{18H}(h=0) + T_{37H}(h=0)] \quad (3)$$

建立 SMMR 雪深转换公式可以通过两种方法实现: 一是把亮度温度与积雪深度的观测结果进行相关分析; 二是通过理论计算。干雪晶的散射效应可以用 Mie 散射理论来描述。当积雪参数和土壤参数已知时, 亮度温度可以通过解辐射传输方程求得:

$$\begin{aligned} \mu \frac{dI(x, \mu)}{dx} = & -\sigma(x)I(x, \mu) + \sigma(x)\{[1 - \omega(x)]B(x) \\ & + \frac{1}{2}\omega(x) \int_{-1}^1 P(x, \mu, \mu') I(x, \mu') d\mu'\} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $I(x, \mu)$  为雪深  $x$  处的微波辐射强度;  $\sigma(x)$  为消光系数;  $\omega(x)$  为单向散射的反射率;  $B(x)$  为雪层辐射源函数;  $P(x, \mu, \mu')$  为相函数;  $\mu$  为辐射强度与法线夹角的余弦;  $\mu'$  为散射角的余弦。Chang 等(1987b)给出的公式(1)就是这样推导出来的。

SMMR 接受的微波辐射不仅来自地表积雪层, 也来自大气。大气微波辐射可分为直接辐射和反射辐射两部分。大气中的氧气、水汽和云滴能对微波产生干扰, 从而影响大气亮度, 其影响程度与它们对微波的吸收系数以及大气厚度有关。例如, 水汽的转移线为  $22.235\text{GHz}$  和  $183.3\text{GHz}$ , 前者为弱吸收线, 后者为强吸收线。氧分子在  $0.5\text{cm}$  处的谐振对  $50\text{—}70\text{GHz}$  微波有强烈影响。因此在  $92\text{GHz}$  下大气亮度温度对大气组成的敏感程度远大于  $37\text{GHz}$ 。在建立公式(1)时, 鉴于大气中水汽对亮度温度的贡献大体与地表的贡献相当, 因此未考虑大气成分对亮度温度的影响。但是对于中国西部而言, 大气组成对亮度温度的影响必须加以考虑。

为了建立适合于中国西部, 特别是青藏高原的区域性 SMMR 雪深转换公式, 纠正全球单一公式(1)给中国西部 SMMR 积雪资料造成的误差。我们首先对公式(1)进行了大气厚度订正。把中纬度冬季标准大气(U.S. Standard Atmospher, 1976), 不考虑云的存在, 叠加于中国西部积雪层之上, 来计算亮度温度(Chang 私人交流)。其次进行了浅层积雪面积误差纠正, 假定 DMSP 积雪图基本上能反映出地面积雪真实状况, 通过 SMMR 积雪图与 DMSP 积雪图的对比, 以及对公式(1)中常数项的调整与试算, 使 SMMR 积雪图给出的积雪面积与 DMSP 积雪图上的积雪面积相逼近。表 3 给出了 SMMR 雪深转换公式常数项的试算结果。这样得出中国西部区域性 SMMR 雪深转换公式如下:

$$SD = 2.0(T_{18H} - T_{37H}) - 8 \quad (5)$$

式中:  $SD$  为积雪深度(cm);  $T_{18H}$  和  $T_{37H}$  分别为  $18\text{GHz}$  和  $37\text{GHz}$  频率下的亮度温度。与公式(1)相比, 斜率的增大和常数项的出现, 分别体现了大气厚度订正与积雪面积纠正的效果。前者使浅雪深估计偏大, 深雪深估计偏低的倾向得到一定程度的克服。常数项比斜率增加对雪深的贡献大得多, 正适合纠正中国西部 SMMR 积雪资料存在的主要

表 3 SMMR 雪深转换公式常数项的调整结果

Table 3 Adjusting offsets subtracted from each snow depth class of  
the SMMR hemispheric algorithm

时 间 (年.月)	常数项 $b$ (cm)	DMSP 积雪面积(%)	SMMR 积雪面积 (%)				SMMR <sub><math>h=0</math></sub> 比 DMSP
			$b = b_i$	$b = 8$	$b = 6$	$b = 0$	
1979.1	16	20.92	20.07	52.10	65.55	84.87	4.06
1980.1	12	36.80	40.48	60.53	71.93	89.47	2.43
1985.1	4	68.04	70.97	36.52	53.04	87.83	1.29
1986.1	5	83.22	83.51	72.31	82.68	93.69	1.13
1987.1	8	71.81	70.55	70.55	85.32	99.08	1.38
1979.3	8	53.50	50.00	50.00	65.84	83.93	1.57
1980.3	11	24.98	29.28	48.15	58.33	81.48	3.27
1985.3	5	45.05	46.01	24.07	36.83	71.30	1.58
1986.3	6	65.08	71.07	54.12	71.07	86.96	1.34
1987.3	7	68.11	67.64	57.13	75.47	92.11	1.35
1978.11	6	59.07	55.95	35.19	55.95	79.63	1.35
1979.11	15	17.62	14.95	51.75	63.16	81.58	4.63
1984.11	5	60.61	63.52	41.82	55.34	85.45	1.41
1985.11	6	79.45	80.01	72.97	80.01	91.89	1.16
1986.11	6	72.68	75.37	64.66	75.37	92.24	1.27
平 均	8	55.13	55.96	52.97	66.39	86.77	1.95

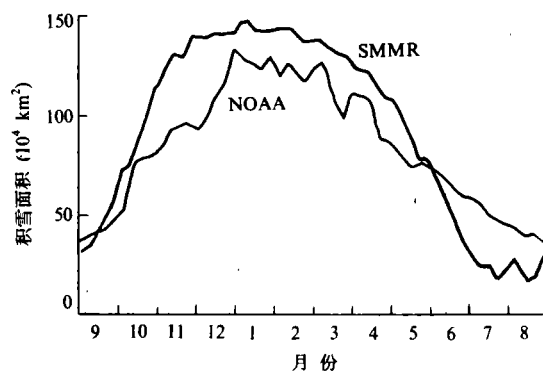


图 2 改正后的 SMMR 积雪资料反映的青藏高原积雪面积季节变化(1978—1987)  
与 NOAA 观测结果(1973—1987)的对比

Fig. 2 Comparison of adjusted SMMR derived seasonal variation of snow area over  
Tibetan Plateau (1978—1987) with NOAA measurements (1973—1987)

问题, 使积雪面积偏大的误差得到克服。

图 1d 给出了经公式(2)改正后的中国西部 SMMR 积雪图。请注意它与图 1a 的区别以及图 1b 和图 1c 的一致性。表 4 列出了修正后的中国西部 SMMR 积雪图中青藏高原和高山地区与 DMSP 积雪图的比较结果。显而易见, 改正后的 SMMR 积雪图在

表 4 改正的 SMMR 积雪图中青藏高原与高山地区与 DMSP 图的比较

Table 4 Comparison of adjusted SMMR charts with DMSP charts in high altitude regions of western China

时 间 (年.月)	SMMR 减 DMSP (面积%)	
	青藏高原	高 山
1978.11	-23.9	-13.5
1979.11	34.1	43.1
1984.11	-18.8	-17.1
1985.11	-6.5	-11.1
1986.11	-8.0	-13.8
1979.1	31.2	28.1
1980.1	23.7	24.8
1985.1	-31.5	-13.5
1986.1	-10.9	-16.7
1987.1	-1.3	-3.6
1979.3	-3.5	5.6
1980.3	23.2	21.3
1985.3	-21.0	1.8
1986.3	-11.0	-17.0
1987.3	-11.0	-24.8
平 均	-2.3	-0.4

中国西部尤其是青藏高原地区和高山地区的精度均有了显著的提高。此外,我们用中国西部 43 个地面气象台站 1979 年 1 月逐日积雪深度观测记录对公式(5)进行了验证。计算积雪深度与观测值相关系数在 0.71 以上,平均预报误差为 4.7 cm。图 2 是改正后 SMMR6 日积雪面积资料所表现的青藏高原积雪面积季节变化(1978—1987)与 NOAA 周积雪图反映的积雪季节循环(1973—1987)的对比。两者的一致性表明, SMMR 积雪资料经公式(2)改正后具有准确地表现青藏高原积雪年际波动与季节变化的能力。

## 参 考 文 献

- 李培基, 1988. 中国季节积雪资源初步评价. 地理学报, 43(2): 108—119
- Chang A T C, 1986. Nimbus-7 SMMR snow cover data. SNOW WATCH'85. report GD-18, 181—187
- Chang A T C *et al.*, 1987a. Nimbus-7 SMMR derived global snow cover parameters. Annals of Glaciology 9, 39—44
- Chang A T C *et al.*, 1987b. Microwave snow signatures (1.5 mm to 3 cm) over Alaska. Cold Regions Science and Technology 13, 153—160
- Chang A T C *et al.*, 1990. Satellite sensor estimates of northern hemisphere snow volume. INT. J. Remote Sensing 11(1): 167—171
- Foster J L *et al.*, 1987. Remote sensing of snow. EOS 68(32): 681—684
- Hallikainen M, Jolma P, 1986. Retrieval of snow water equivalent from Nimbus-7 SMMR data. SNOW WATCH 85. report GD-18, 173—179
- Li Peiji, 1987. Seasonal snow resources and their fluctuations in China. In: Large Scale Effect of Seasonal Snow Cover, IAHS Publ 166: 93—104



- Robinson D *et al.*, 1984. Comparative utility of microwave and shortwave satellite data for all-weather charting of snow cover. *Nature* **312**(5993): 434—435
- U S, Standard Atmosphere 1976. NOAA-S / T 76-1562 Department of commerce. Washington D. C., 227
- Weaver R, Morris C, Barry R G, 1987. Passive microwave data for snow and ice research: Planned products from the DMSP SMM / I system *EOS* **68**(39): 769, 776—777

## First Revisal of SMMR World Map Over Western China

Li Peiji and Cao Meisheng

(*Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Academia Sinica*)

A. T. C. Chang

(*Hydrological Sciences Branch, NASA Goddard Space Flight Center*)

D. A. Robinson

(*Department of Geography, Rutgers University*)

### Abstract

Baced on analysis of inaccuracies and limits for use of SMMR snow products in western China, and by comparisons of world snow maps produced by NASA employing data from SMMR with DMSP imagery, NOAA snow charts, and station data, a regional snow parameter retrieval algorithm was developed to replace the current single hemispheric algorithm, and to account for the effect of the atmospheric conditions as well as snow area adjustment in western China. This resulted in improved snow depth and snow cover area estimates in western China when compared with meteorological station data and DMSP snow charts. The adjusted SMMR snow data have ability to monitor annual cycle and year-to-year fluctuation of snow cover over the Tibetan Plateau.

**Key words:** passive microwave remote sensing of snow, comparison of snow cover datasets, effect of atmospheric conditions, snow-depth retrieval algorithm adjustment