

祁连山区季节性积雪资源的气候分析

陈 乾 陈添宇*

(兰州干旱气象研究所)

提 要: 本文采用1986年10月至1988年9月NOAA—9、10两颗卫星的AVHRR资料标准化后反演的积雪参量,对照祁连山区26个气象站1951—1988年逐日雪深、雪密度和积雪日数的资料,修正卫星反演的平均值。得到高分辨率多年平均雪深和雪盖频率的空间分布,从而估算出各流域平均雪储量,并与降雪量和春季融雪径流作对比分析。

主题词: 卫星反演雪资源 祁连山区

一、资料处理方法

高山积雪是我国北方干旱地区重要的水资源。祁连山区约半数的融雪水支持着河西走廊农业、工业和生活用水。黑河和石羊河水系是我国内陆河流域水资源供需矛盾较突出的地区,在平水年(保证率 $P=50\%$)缺水率9%,遇到中等干旱年份($P=75\%$)则高达14%¹⁾。因此正确地分析祁连山区季节性积雪资源是制订节水措施,阻止石羊河下游已出现的沙漠化,保护绿洲生态平衡的依据。另一方面由于雪盖与其它下垫面有显著差异,因而我国的旱涝变化与青藏高原雪盖面积之间关系的研究,也一直吸引着许多气候学家的兴趣。

为精确计算稳定积雪区的面积,雪线高度、雪深和雪储量的空间分布。本文采用1986年10月至1988年9月NOAA—9和10两颗卫星的AVHRR资料插到 $1.2' \times 1.2'$ 经纬度网格上,并输入相应格点的海拔高度,反演积雪参量和雪线高度,具体步骤如下:

1. 将NOAA—9的通道1, 2辐射信息标准化到NOAA—10。由于通道1, 2无空中定标能力,我们采用地面特征季节变化最小且平坦的巴丹吉林沙漠作为检验卫星辐射测量定标的目标区。NOAA—9通道1传感器有衰减,根据Brest等提供的衰减率 $1.004/\text{月}^{[1]}$ 作第一步修正。这两颗卫星飞经目标区的时间不同,反射率作太阳天顶角余弦订正所造成的误差也须修正,考虑上述诸因素,将NOAA—9通道1, 2的反射率标准化到NOAA—10的回归方程为²⁾。

$$\text{ch}_1(N-10) = 1.3627 + 0.9393(1.075 + 0.014 \times \text{Mon}) \times \text{ch}_1(N-9) \quad (1)$$

本文1989年9月15日收到,1990年4月28日收到修改稿。

* 本工作得到国家气象局气象科学基金气候项目和甘肃省自然科学基金的资助。

1) 王国栋主编,内陆河水资源利用。水电部兰州勘测设计院1986年。

2) 陈乾、郭妮,NOAA—9与NOAA10通道1和2反射率的对比分析和定标。(尚未发表)

$$\text{ch.2}(N-10) = 3.6519 + 0.7673 \times \text{ch.2}(N-9) \quad (2)$$

这里 $\text{ch.1}(N-10)$, $\text{ch.1}(N-9)$, $\text{ch.2}(N-10)$, $\text{ch.2}(N-9)$ 分别为 NOAA-10 和 9 通道 1 和 2 的反射率, Mon 为自 1986 年 10 月起计算的月数, 例如 1987 年 4 月 Mon = 6。

2. 判别雪盖时取门槛值 $\text{ch.1} \geq 30\%$, $(\text{ch.1} - \text{ch.2}) \geq 0$ 。由于雪盖与云在可见光波段 (ch.1) 反射率接近, 用考虑海拔、季节和日变化后的亮温门槛值区分云和雪。

3. 对雪盖区用下列公式估算雪深和雪水当量。

$$S_z = 1.575 \times (0.152 \times \text{ch.1} + 0.157 \times (\text{ch.1} - \text{ch.2}) - 3.34) \quad (3)$$

这里 S_z 为雪深 (cm), ch.1 和 ch.2 分别为通道 1 和 2 标准化后的反射率 (%)。

$$\text{SWE} = \sum_{i=1}^N S_z \times \rho_n \times 10^4 \times 4.9457 \times \cos \phi \quad (4)$$

$$\rho_n = 0.12 \times (n+1)^{-0.18} \quad (5)$$

这里 SWE 为雪水当量 (m^3) ρ_n 是降雪后第 n 天的雪密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), N 为流域内雪盖格点数, ϕ 为地理纬度, 反注模式详见文献^[2]。

4. 为增加卫星资料反演的平均值在气候上的代表性, 与 17 个具有 28 年以上资料的气象站月、年平均雪深和雪盖频率建立统计关系, 得出约 2 Km 分辨率的雪盖频率、平均雪深和雪储量的空间分布图。

5. 取 26 个气象站 1951—1988 年逐日雪深和积雪日数资料, 分析了积雪的季节变化和年际变化, 为估算雪水当量分析了雪密度的时空变化。然后输入流域边界, 用 (4) 式估算各流域平均雪水当量。

二、雪盖的分类、区划和空间分布

根据李培基等对中国积雪的分类^[8], 祁连山区的积雪可分为永久积雪、稳定的季节性积雪和不稳定的积雪三类。永久积雪显然以年积雪日数 365 天为界; 稳定和不稳定的积雪以雪盖频率 40% 为界较宜。月或季雪盖频率 40% 以上的地区, 为稳定积雪。因此雪盖频率分布图上 40% 等值线所围面积为稳定积雪范围, 其对应的高度即雪线高度。图 1 是 4—5 月雪盖频率分布图, 可清晰地看出三类雪盖的范围和雪线位置。9—5 月稳定的季节性积雪面积约占祁连山区总面积的 38.7%, 其中 12—2 月最小, 9—11 月最大, 12—2 月整个山区平均雪线最高达 4085m, 3—5 月平均雪线为 3991m。永久积雪区呈斑点式分布,¹⁾ 其总面积 (约 1972.5 Km^2) 仅占 4—5 月稳定积雪面积的 3.5%, 其中以河西内陆河流域最大为 1334.7 Km^2 , 粒雪线高度平均 4790m, 由东向西自 4312m 升高到 5050m (表 1)。

祁连山区雪深比我国新疆和黑龙江省北部小, 与某些多雪国家如苏联瑞士和加拿大相比则更小^{[8]、[5]}。气象站平均雪深 1.2—3.3cm, 年平均累积雪深 40—356cm。雪深空间分布受海拔和地形两个因子支配, 海拔最高的木里 (4088m) 积雪最深。地形迎风坡降雪量大加

1) 王宗太等编。中国冰川目录 I 祁连山区。兰州冰川冻土研究所, 1981 年。

表 1 祁连山区各流域永久和稳定的季节性积雪区面积和雪线高度
Ares of firm and stable seasonal snow covel and altitude of firm
lines and snow lines in every River basins of Qilian Mt. region.

一级水系	二级水系	河 流 名	集水 面积 (km ²)	永久积雪区			4—5月稳定积雪区			12—2月积雪区			9—5月积雪区		
				面积 (km ²)	%	粒高 雪度 线(m)	面积 (Km ²)	%	雪高 线度 (m)	面积 (Km ²)	%	雪高 线度 (m)	面积 (Km ²)	%	雪高 线度 (m)
河西内 陆河 流域 水系	疏勒河	党河	15115	259.74	1.7	4887	6752	44.7	4022	4494	29.7	4124	6440	42.6	4057
		昌马河	11417	554.81	1.9	4765	5258	46.1	4035	3435	30.1	4088	4904	42.6	4082
		石油、白杨河	<5327>	34.83	0.9	4670	<1068>	20.0	<3800>	<613>	<11.5>		<1010>	19.0	
		小计	31859	849.38	2.7	4798	13078	11.0	4009	8542	26.8		12354	38.8	
	黑河	讨赖河	6969	136.67	2.0	4630	2293	32.9	3948	1240	17.8	4064	2018	29.0	3998
		洪水坝河	1605	130.84	8.2	4705	648	40.4	3728	218	13.6	4247	438	27.3	3994
		丰乐河	568	23.25	4.1	4665									
		马营河	619	19.52	3.1	4515	<468>	15.7	<3626>	<64>	<2.1>		<420>	14.1	
		摆浪河等	<1800>	15.13		4450									
		梨园河	2211	16.18	0.7	4550	482	21.8	3621	81	3.7	3806	263	11.9	3693
		黑河	10330	59.00	0.6	4440	3201	31.0	3905	1528	14.8	3991	2902	28.1	3946
		酥油河以东各河	<2825>	19.96	0.7	<4500>	<443>	15.7	<3630>	<63>	<2.2>		<405>	14.3	
		小 计	26927	420.55	1.6	4580	7535	28.0	3851	3194	11.9		6446	23.9	
		西大和东大河	<2729>	31.43	2.1	4375	<712>	26.1	<3680>	<77>	<2.8>		<583>	214	
		西营河	1455	19.80	1.4	4260	451	31.0	3765	192	13.2	3836	372	25.6	3823
		金塔河	1005	6.73	0.7	<4300>	231	23.0	3612	35	3.5	3801	198	19.7	3489
		杂木河	302	3.86	0.4	<4260>	341	37.8	3666	47	5.2	3887	232	25.7	3745
		黄羊河	884	0			193	21.8	3674	24	2.7	3788	113	16.2	3640
		古浪河等	<991>	0			<160>	16.1	<3680>	<20>	<2.0>		<191>	19.3	
		小 计	7966	64.82	0.8	4312	2088	26.2	3688	395	5.0		1717	21.6	
	合计/平均		66752	1334.75	2.0	4706	22701	34.0	3913	12131	18.2	3986	20517	30.7	3916
	占总计的%		47.0	67.7			41.9			29.8			37.3		
内陆湖 和柴达木 水系	哈拉湖	哈拉湖	4952	89.27	1.8	4905	3391	68.5	4381	3569	72.1	4347	3729	75.3	4383
		青海湖北部	23012	13.29	0.06	4775	6574	28.6	4111	4117	17.9	4163	7134	31.0	4145
		小 计	21964	102.56	0.4	4888	9965	35.6	4203	7616	27.5	4196	10863	38.8	4190
	柴达木水系	哈尔腾河	5967	322.46	5.4	4959									
		鱼卡河	2097	64.74	3.1	5050									
		塔塔棱河	4771	104.15	2.2	5030									
		巴音河	5544	2.87	0.05	4900									
		其 它	12345	0											
		小 计	30721	494.22		4985	15982	52.0	4102	17217	56.0	4256	17417	56.7	4153
	合计/平均		58685	596.78		4969	25947	44.2	4141	24903	42.4	4227	28280	48.2	4169
	占总计的%		41.3	30.2			47.8			61.1			51.5		
黄河水系	大通河	大通河	12571	40.97	0.3	4610	<4322>	34.4							
		北川河	2774	0			<898>	32.4							
		湟水上游	1283	0			<393>	30.6							
	合计/平均		16631	40.97	0.25	4610	5613	33.8	3976	3705	22.3	3981	6168	37.1	3960
占总计的%		11.7	2.1				10.3			9.1			11.2		
总 计/平 均			142068	19725	1.4	4790	54261	38.2	4028	40739	28.7	4085	54965	38.7	4029

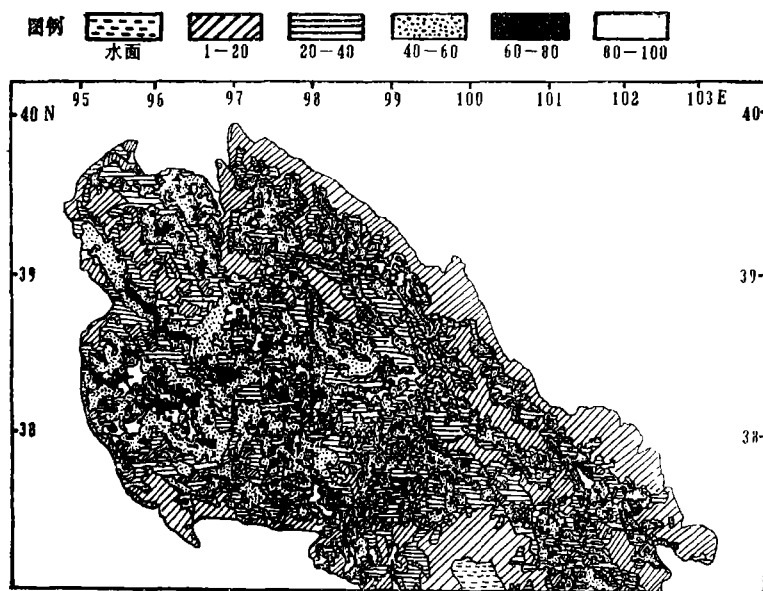


图 1 由卫星资料反演的春季(4~5月)雪盖频率分布图
Frequency distribution of snow cover retrieving from satellite AVHRR
data in spring (April-May)

之积雪堆积,因此在祁连山区东北边坡形成一条较厚的积雪带,年平均雪深约 3 cm。背风坡的梨园河和黑河峡谷中积雪仅 1.2—1.7 cm。就同一海拔而言阴坡大于阳坡,如玉门市比肃南年平均雪深大 1.8 cm。最大雪深 36 cm 出现在 1988 年 5 月 11 日乌鞘岭气象站。卫星反演的 4—5 月平均雪深分布图(图 2a)表明,地形影响更加明显,梨园河雪深分布变率最大达 0.75,哈拉湖面最小仅 0.14,整个山区雪深变率 4—5 月最小,12—2 月最大,雪盖频率的空间变率则相反,这可能因为 4—5 月经常出现较大的降雪过程且融化强烈。就流域而言各季雪深和雪盖频率的变率均以河西内陆河流域最大。9—5 月各流域平均雪深 4.3 cm 以梨园河流域最薄,哈拉湖最深(表 2)。图 2b 是按图 2a 资料统计的甘肃省河西内陆河流域 4—5 月各级雪深面积及其海拔高度分布图,可看出 2—4 cm 雪深所占面积最大为 23091 km²,占流域总面积的 35%。随着雪深增厚其海拔单调上升。祁连山区各流域占面积最大的雪深有差异:梨园河、黑河、杂木河、黄羊河等较薄为 2—4 cm;哈拉湖流域最厚 8—10 cm。整个祁连山区大于 15 cm 雪深总面积以冬季最大约 538 km²。各流域平均最大雪深自西向东减薄,积雪最深的地点位于海拔 4000 m 以上地区,冬季在疏勒南山南坡平均最大雪深为 29 cm。

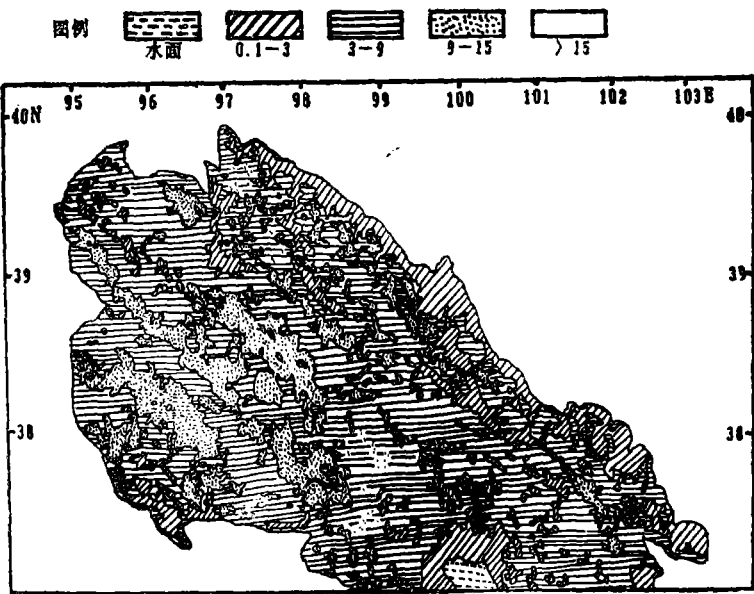


图 2a 由卫星资料反演的春季(4—5月)平均雪深分布图。
Mean distribution of snow depth retrieving from satellite
AVHRR data in spring (April-May)。

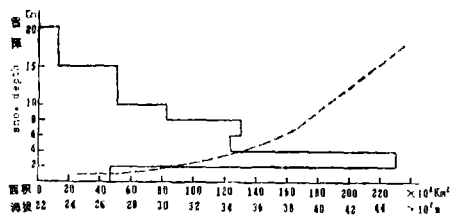


图 2b 按图2a资料计算的甘肃河西内陆河流域各级雪深面积及其海拔高度直方图, 实线为面积, 虚线为海拔高度。
Area and altitude VS. mean daily snow depth
distribution of Hexi continental river basins of
Gansu province (based on the data in Fig. 2a).

表 2 祁连山区各流域卫星资料反演的各季雪深和雪深、雪盖频率空间变率
Snow depth and variability (cv) of seasonal depth and
snow cover frequency retrieving from satellite AVHRR
date in every River basin in Qilian Mt. region.

项 目 河流名	9—11月				12—2月				3—5月				9—5月	
	雪 深			雪盖频 率变率	雪 深			雪盖频 率变率	雪 深			雪盖频 率变率	雪深	
	平均	最大	变率		平均	最大	变率		平均	最大	变率		平均	最大
党 河	3.4	18	0.43	0.47	4.1	<25>	0.59	0.49	6.2	21	0.49	0.59	4.6	<25>
昌 马 河	3.9	23	0.62	0.42	3.5	20	0.62	0.42	6.1	20	0.46	0.59	4.5	23
讨 赖 河	3.2	17	0.44	0.40	3.2	21	0.59	0.35	5.4	19	0.49	0.60	3.9	21
洪水坝河	3.1	17	0.70	0.54	2.6	13	0.74	0.40	5.6	14	0.55	0.70	3.8	17
梨 园 河	2.4	13	0.63	0.58	1.8	9	0.51	0.34	3.9	12	0.73	0.83	2.7	13
黑河西支	3.6	14	0.46	0.28	2.9	15	0.68	0.33	5.4	16	0.39	0.55	4.0	16
黑河中支	3.1	15	0.55	0.42	2.2	18	0.44	0.25	4.3	16	0.58	0.70	3.2	18
黑河东支	3.8	18	0.58	0.36	2.9	9	0.55	0.31	4.6	13	0.47	0.70	3.8	18
西 营 河	3.6	13	0.59	0.46	3.3	12	0.72	0.37	5.5	14	0.49	0.58	4.1	14
金 塔 河	2.9	8	0.66	0.61	1.7	8	0.61	0.32	4.7	11	0.52	0.81	3.1	11
杂 木 河	3.6	13	0.71	0.46	2.6	12	0.70	0.24	5.3	15	0.49	0.65	3.8	15
黄 羊 河	3.3	13	0.64	0.39	2.0	9	0.40	0.19	4.3	13	0.49	0.66	3.2	13
河西内陆河	3.3	23	0.57	0.50	3.0	<25>	0.78	0.45	5.3	21	0.54	0.68	3.9	<25>
哈 拉 湖	3.4	10	0.38	0.31	8.3	14	0.24	0.24	8.9	12	0.19	0.26	6.9	14
哈拉湖流域	4.5	25	0.51	0.34	4.1	<29>	0.63	0.42	7.2	17	0.33	0.46	5.3	<29>
青海湖北部流域	3.4	16	0.47	0.43	3.0	16	0.58	0.32	5.2	16	0.48	0.59	3.9	16
柴达木内陆河	5.5	25	0.43	0.47	5.2	24	0.59	0.44	6.4	29	0.47	0.56	5.7	25
内陆湖及柴达木	4.6	25	0.45	0.44	4.2	<29>	0.59	0.39	6.0	20	0.46	0.57	4.9	29
大通河、湟水	3.8	15	0.50	0.35	3.0	22	0.59	0.33	5.3	<19>	0.41	0.57	4.0	22
祁连山区	3.9	25	0.51	0.46	3.5	<29>	0.68	0.41	5.6	21	0.49	0.62	4.3	<29>

三、积雪的季节变化

卫星反演的整个山区逐月平均雪深和雪储量的季节变化呈明显的双峰型, 峰值出现在11月和5月(图3), 与山区内部3 Km以上各站逐月积雪参量的变化相似。积雪的季节变化

主要受气温和降雪两个因子支配。由于祁连山区四周边坡冬季降雪量较山内多,而春、秋季则相反。因而海拔较低的边坡厚的积雪出现在气温最低的隆冬,呈单峰型,而山区内部则呈双峰型。图4a可看出单峰转为双峰的高度在2500m附近,就整个山区而言,转变为双峰型的海拔高度由东北向西南升高到3300m。逐月平均和累积雪深的季节变化与积雪日数相似。唯山区边坡低海拔地区的单峰型不如积雪频率明显,而累积雪深和平均雪深变化趋势基本相似(如图4b)。积雪的季节变化受风吹、日晒和热力等外部环境因素影响而消耗,即使冬季仍然如此。特别是山区内部冬季降雪极为稀少,补给

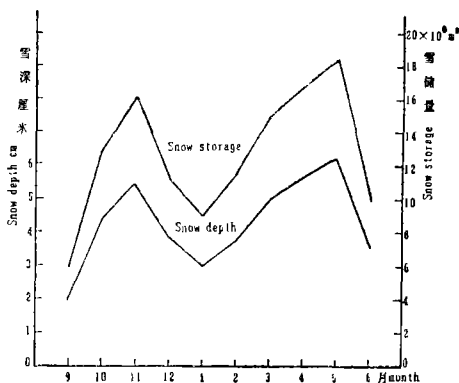


图3 由卫星资料反演的祁连山逐月平均雪深和雪储量时间曲线(9—6月)

Monthly mean snow depth and snow storage retrieving from AVHRR data in Qilian Mt. region during September — June.

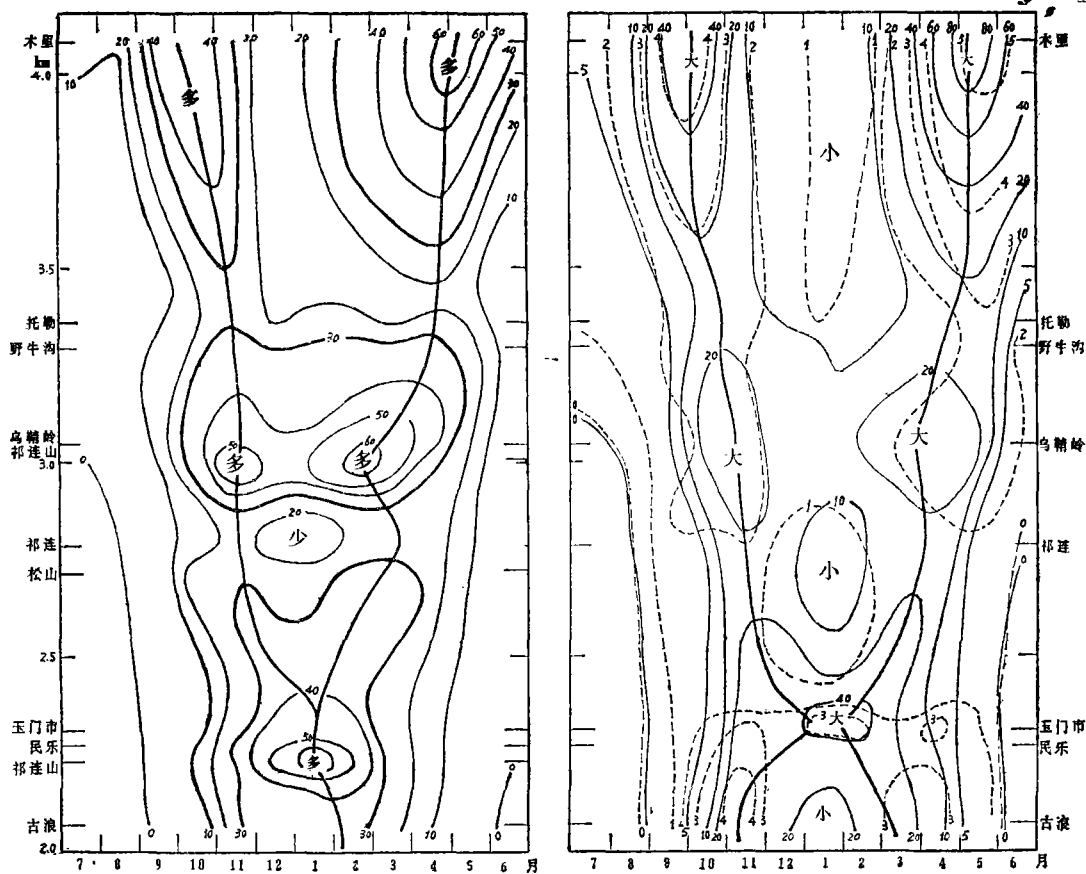


图4 甘肃河西内陆河流域逐月积雪参量随海拔分布图

Monthly mean distribution of snow parameters of Hexi continental river basins with its corresponding altitude.

a. 积雪日数百分率, 图中细实线为等频率线, 粗实线为峰值出现时间, 其中30%的等频率线加粗以示稳定积雪。

b. 累积雪深(细实线)和平均雪深(虚线)粗实线为峰值出现时间。

远小于消耗，因此，雪深自秋到冬逐渐减少。春季随着气温上升，消耗虽比冬季增大，然而降雪补给增加更快，因而出现第二个更大的峰值。

四、积雪的年际变化

年逐日累积雪深以1977—78年冬最大，祁连山区16个站平均为 277cm（图 5），与全国最多积雪年出现时间一致^[6]。看来与冷空气活跃有关。然而湟水流域则以 1982—83 年冬累积雪深最大，可能是高原局地环流异常所致。1964—65年积雪最少仅 31cm。表 3 给出17个气象站的年积雪日数、年平均和逐日累积雪深的均方差 σ 和变率 C_v 值，在稳定的季节性 积雪区内积雪日数的 C_v 值小于年平均和累积雪深的 C_v 值。三个积雪参量的 C_v 值均以柴达木盆地北缘的德令哈最大，山区中部海拔最高的木里最小。

根据有28年以上年逐日累积雪深观测序列的12个气象站和某些站的年积雪日数资料，作周期分析和功率谱计算，发现两者主周期不一致。周期分析表明几乎所有的站 7—9 年周期都通过0.15的信度检验，河西内陆河流域多数站还存在 4—5 年和12—14年的周期；而功率谱分析较集中的是 2—3 年周期，但只有 5 个站通过0.15信度的白噪声检验。图 5 是序列最长（37年）的乌鞘岭年积雪日数和累积雪深的时间序列周期分析曲线，两者基本一致均以 7 年周期为主，分别通过0.05和0.10信度的显著性检验，乌鞘岭的时间序列曲线能代表河西内

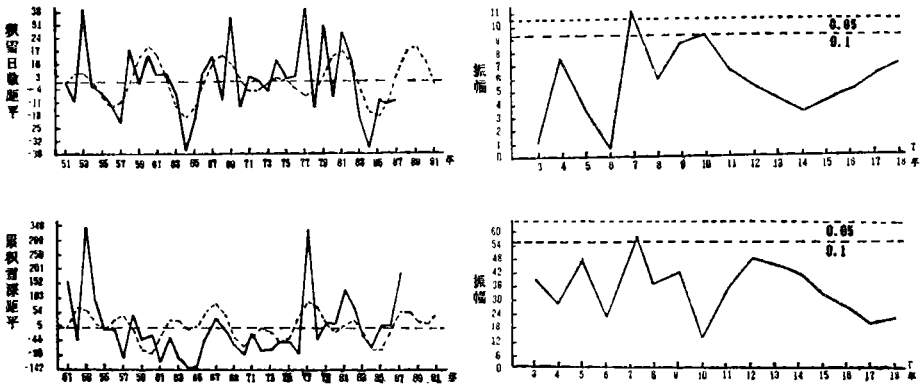


图 5 甘肃省乌鞘岭年积雪日数和累积雪深的时间序列周期分析。左图实线是样本曲线，虚线为取 2 个主周期拟合的曲线，水平虚线为平均值 \bar{X} 和 $\bar{X} \pm \sigma$ ，右图实线为振幅谱曲线，水平虚线为信度 = 0.05 和 0.10 检验临界值。
Period analysis of time series of annual cumulation of days and daily depth of snow cover at Wushaoling station. Left: curves of sample (solid lines) and fitting for two major period (dashed lines) with mean value as dashed horizontal lines. Right: curves of amplitude spectra with the critical values of reaching 0.05 and 0.10 significant level of test as dashed horizontal lines.

表 3 祁连山区17个气象站年积雪日数, 年平均和累积雪深的标准差 σ 和变率(CV)
Mean square deviation (σ) and variability (CV) of annual snow days, annual means and cumulative daily snow depths at 17 weather stations in Qilian Mt. region.

水 系	甘 肃 省 河 西 内 陆 河 流 域										黄 河 水 系					柴达木水系		
	站 名	古浪	民乐	玉门	肃南	祁连	乌鞘	野牛	托勒	木里	互助	大通	门源	却藏	海晏	德令哈	刚察	天峻
积雪日	σ	16.89	20.47	20.76	11.62	7.77	18.66	23.20	23.63	18.07	18.81	16.91	17.19	15.15	14.56	17.70	14.85	14.60
雪数	Cv	0.30	0.31	0.35	0.26	0.25	0.17	0.29	0.46	0.15	0.44	0.39	0.30	0.25	0.38	0.63	0.40	0.46
平雪	σ	0.92	1.03	1.00	0.39	0.45	0.85	0.58	0.43	1.15	0.95	0.76	0.62	1.03	0.38	1.43	0.54	0.78
均深	Cv	0.34	0.38	0.37	0.33	0.35	0.44	0.34	0.25	0.30	0.45	0.42	0.30	0.41	0.35	0.51	0.36	0.33
累雪	σ	81.80	114.29	110.53	23.87	18.87	110.89	69.52	53.72	118.95	71.74	56.43	88.28	88.77	22.81	85.36	47.10	43.42
积雪	Cv	0.57	0.69	0.64	0.52	0.47	0.55	0.60	0.77	0.33	0.82	0.88	0.81	0.59	0.53	1.11	0.87	0.73
资料年数		29	30	14	28	32	37	30	32	11	14	32	32	19	16	33	31	31

表 4 祁连山区各流域果年平均新雪和雪密度
Annual mean fresh snow and snow density in every river basins in Qilian Mt. region.

水系名称	站数	海拔高度	新雪密度 (克/厘米 ³)					雪密度 (克/厘米 ³)				
			合计	次数	平均	最大	最小	合计	次数	平均	最大	最小
河西内陆河	8	2274—4088M.	33.49	259	0.129	0.24	0.03	46.58	335	0.132	0.31	0.03
黄河水系	5	2480—4088M.	23.87	214	0.112	0.24	0.05	27.59	239	0.115	0.30	0.05
柴达木水系	3	2082—3417M.	9.39	80	0.117	0.26	0.05	11.00	91	0.118	0.26	0.05
祁连山区	16	2274—4088M.	66.75	553	0.120	0.26	0.03	85.17	665	0.128	0.31	0.03

陆河流域大部份站, 只是 4—5 年周期不太显著, 而古浪、民乐、肃南和野牛沟等站该周期均通过 0.10 信度检验, 门源的周期分析和功率谱能代表湟水和柴达木内陆河水系各站, 只存在一个 7—8 年主周期。由此可见祁连山区积雪以 7—9 年周期最普遍。取二个主周期拟合的曲线展望 1988 至 1993 年河西内陆河流域的年累积雪深除民乐、肃南略偏少外, 其余各站均偏多 4—67%, 以乌鞘岭最多, 1988—1990 年二个冬春积雪的实况表明预计是正确的。

五、雪密度的时空变化

由于直接测量雪水当量的资料极少, 而大范围的雪深可由遥测测量, 由雪深估算雪水当量必须测定雪密度。我们取过去 24 小时内降落的雪为新雪密度。各流域新雪密度的平均值均比全部雪密度资料的平均值小 (表 4)。这表明随着雪的年龄增长其密度增大。雪密度的空间分布主要受海拔和地形影响, 海拔最高的托勒掌附近雪密度最大, 其次是位于迎风坡风口上的乌鞘岭为 $0.15\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 最小值在背风坡的互助仅 $0.09\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (图 6)。按观测规范气象站雪密度只有当雪深大于 5cm 时每隔 5 天才观测一次, 因此我们只能挑选有 45 次以上雪密度资料的 6 个站分月统计其月平均值 (表 5), 看出自 9 月后雪密度逐渐增大至 12 月达峰值, 这是秋季的积雪随雪龄增加被压实所致。1—2 月老雪已消耗完, 新雪在低温下降落加之雪深较薄其密度最小, 4—5 月降雪时气温较高且受间歇性融解影响密度又增大, 5 月达峰值。可见积雪密度随时间的增长受强风和间歇性融解影响, 同时还受雪深支配。然而时间是主导因素。Martinez 曾导出一个雪密度随时间增长的经验公式^[4]。我们对不同的初始密度 ρ_0 用统计方法拟合出密度随时间增长的一组经验公式:

$$\rho_n = 0.06(n+1)^{0.81}$$

$$\rho_n = 0.07(n+1)^{0.28}$$

$$\rho_n = 0.08(n+1)^{0.25}$$

$$\rho_n = 0.09(n+1)^{0.22}$$

$$\rho_n = 0.10(n+1)^{0.20}$$

$$\rho_n = 0.12(n+1)^{0.16}$$

$$\rho_n = 0.15(n+1)^{0.10}$$

(6)

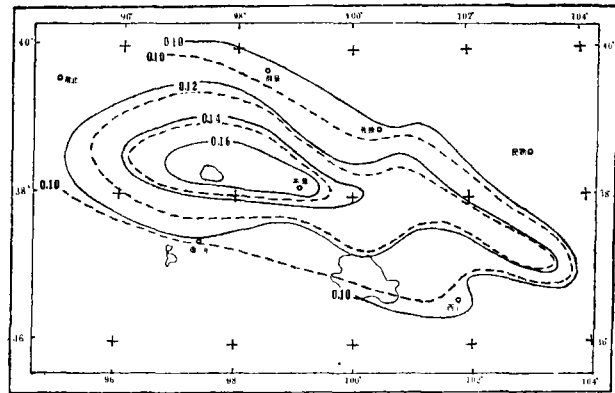


图 6 祁连山区累年平均雪密度 (实线) 和新密度 (虚线) 分布

Annual mean distribution of daily snow density (solid lines) and fresh snow density (dashed lines) in Qilian Mt. region.

Martinez 曾导出一个雪密度随时间增长的经验公式^[4]。我们对不同的初始密度 ρ_0 用统计方法拟合出密度随时间增长的一组经验公式:

这里 ρ_n 是 n 天后的老雪密度, n 是积雪的天数。(6) 式表明祁连山区雪密度增长小于其他地区, 这可能因雪深较薄之故; 雪密度的增长率随初始密度 ρ_0 增大而减小; ρ_0 虽不同但随着时间的延长其差异很快减小, 50 天后已非常接近, 100 天后趋于同一值 $0.251\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 比国外^[5]

表 5 祁连山区6站逐月平均雪密度
Monthly mean snow density at 6 weather stations in Qilian Mt. region.

站名	项 目	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6月
民乐	次数		6	20	10	8	6	11	14	2	
	平均		0.122	0.134	0.102	0.136	0.102	0.123	0.155	0.155	
	最大		0.15	0.24	0.16	0.17	0.16	0.19	0.25	0.18	
	最小		0.10	0.03	0.06	0.03	0.05	0.08	0.05	0.13	
乌鞘岭	次数	3	8	13	8	2	3	23	27	14	2
	平均	0.133	0.149	0.143	0.173	0.110	0.100	0.151	0.155	0.149	0.140
	最大	0.15	0.21	0.21	0.25	0.12	0.15	0.31	0.24	0.21	0.16
	最小	0.11	0.08	0.07	0.07	0.10	0.06	0.07	0.07	0.08	0.12
托勒	次数	1	5	1	0	0	1	4	6	17	11
	平均	0.150	0.120	0.160			0.100	0.095	0.130	0.148	0.167
	最大		0.20					0.12	0.19	0.23	0.20
	最小		0.07					0.08	0.10	0.08	0.10
门源	次数	1	16	15	6	4	1	31	19	8	
	平均	0.10	0.098	0.095	0.182	0.178	0.08	0.099	0.104	0.116	
	最大		0.16	0.16	0.30	0.20		0.14	0.15	0.16	
	最小		0.09	0.05	0.16	0.17		0.05	0.08	0.09	
大通	次数		5	15	8	1	9	16	15		
	平均		0.096	0.116	0.123	0.10	0.148	0.101	0.094		
	最大		0.15	0.17	0.16		0.19	0.15	0.16		
	最小		0.08	0.06	0.09		0.11	0.05	0.06		
刚察	次数	2	10	12	3	0	1	6	12	7	
	平均	0.095	0.117	0.120	0.152		0.050	0.113	0.146	0.154	
	最大	0.13	0.23	0.19	0.22			0.18	0.26	0.22	
	最小	0.06	0.06	0.05	0.09			0.05	0.09	0.10	

0.399g·cm⁻³为小。因而ρ₀对雪水当量的估算影响不大，我们取整个祁连山区的平均新雪密度0.12g·cm⁻³为ρ₀用（5）式计算雪水当量。按（6）式取对数座标可给出一组不同ρ₀下雪密度随时间增长的曲线（图7a）与国外同类图（7b）^{〔6〕}相比，可看出祁连山区雪密度增长率（曲线的斜率）明显偏小。

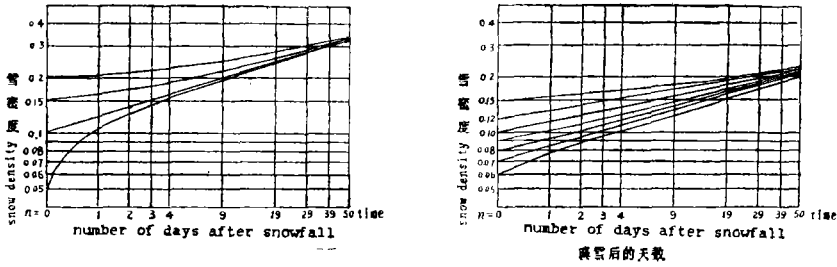


图 7 不同初始密度下雪层的密度随时间的增长
a) 祁连山区 b) 引自霍尔马丁纳斯
Increase of snow density with time for snow
layers with different initial density

六、雪水资源的特征

采用 $1.2' \times 1.2'$ 经纬度网格上卫星反注的雪水当量，计算出各流域春季和年平均雪储量，取1951—1980年山区各河流出口口的32个水文站3月下旬至6月上旬累年平均总经流量，用常规分割基流的方法扣除地下水补给经流后作为融雪径流量。按资料^[6]估算各流域年降雪量，结果见表6。可看出三个大区中降雪量、雪储量和春季融雪径流量均以河西内陆河流域最大，各占总量的50%左右。祁连山区年总降雪量约160.5亿方，9—5月平均雪储量12.9亿方，仅占年降雪量的8%，4—5月最大为17.5亿方，春季融雪径流12.5亿方占年总地表径流量的14.4%，占年总降雪量的7.8%，地域差异明显，疏勒河流域仅2.6%，石羊河流域24.1%，这里河流短小，地下水补给量小，气温较高降雪融化强烈，故地表径流相对较大。值得注意的是春季融雪径流占平均雪储量的71.2%，石羊河和大通河出现融雪径流大于平均雪储量的现象（表6），此乃春季融化和补给交替发生，卫星资料取自晴空时段平均值偏小。更主要的是春季逐日雪储量不是文献^[6,7]那样单调下降的衰退曲线，我们按1987年3月21日至6月1日河西内陆河流域逐日降水量图，算出流域平均降水量后，取0.5折算系数扣除液态降水，推算出的逐日雪储量与估算值基本一致（图8），看出每场大雪约出现3亿方以上的补给量，4月下旬至6月上旬天气转晴后每天平均消融量可达1亿方，因而波动较大。取3月21日的雪储量为初值将每场降雪后的逐日补给量累加起来按（7）式得到3月下旬至5月25日的累积雪储量约为22亿方。

$$\sum SW = SW_0 + \sum_{i=1}^N \Delta SW_i \quad (7)$$

这里 $\sum SW$ 为累积雪储量， SW_0 为初始雪储量， N 为补给总日数， ΔSW_i 为第 i 日的补给量。这样春季融雪径流约占累积雪储量的28%，即72%的雪水消耗于蒸发和下渗，这比较合理。我们认为补给主要出现于春季的地区取累积雪储量表征雪资源更好些。

表 6 祁连山区各流域降雪量、储雪量和春季(3月下旬至6月上旬)融雪径流量

(单位: $\times 10^8 \text{m}^3 = \text{亿方}$ unit: $\times 10^8 \text{m}^3$)

Annual snowfall, snow storage and spring runoff of snowmelt production in every River basin in Qilian Mt. region.

一级水系	二级水系	河 流 名	控 制 水 文 站	平均年降雪量		平均雪储量及其占年降雪量%				春季融雪径流	
				降雪量	%	9—5月 平均	%	4—5月 平均	%	地表径流	%
甘肃省河西内陆地河流域水系	疏勒河	党 河	党城湾	19.98	12.4	1.4521	7.3	2.0213	10.1	0.358	1.3
		昌马河	昌马堡	19.09	11.9	1.0876	5.7	1.6147	8.5	0.634	2.3
		石油和白杨河	玉门市	4.82	3.0	<0.4966>	10.3	<0.6478>	12.2	0.169	3.7
		小 计	白杨河	43.89	27.3	3.0363	6.9	4.2838	9.8	1.161	2.6
	黑 河	讨赖河	冰 沟	9.09	5.6	0.5751	6.2	0.8588	9.3	0.259	2.8
		洪水坝河	新 地	1.79	1.1	0.1279	7.1	0.1978	11.1	0.171	9.5
		丰乐至摆浪河	丰乐河红湾峡	3.14	2.0	<0.1535>	4.9	<0.1972>	6.2	<0.348>	11.1
		梨园河	干沟门	2.91	1.8	0.1253	4.5	0.1948	6.7	0.154	5.3
		黑 河	莺落峡	12.65	7.9	0.8021	6.3	1.1415	9.0	1.407	11.1
		酥油至马营河	李 桥	4.55	2.8	<0.1460>	3.2	<0.1864>	4.1	<0.675>	14.8
		小 计		34.06	21.2	1.9299	5.7	2.7765	8.2	2.014	8.8
	石羊河	西大和东大河	插剑门、 沙沟寺	3.53	2.2	<0.1275>	3.6	<0.1871>	5.2	0.531	11.9
		西营河	九条岭	3.36	2.1	0.1018	8.9	0.1378	12.6	0.551	10.2
		金塔河	青咀湾下湾			0.0650		0.1011		0.171	
		杂木河	杂木寺			0.0730		0.1030		0.421	
		黄羊河	沙金台	1.44	0.9	0.0594	3.8	0.0820	6.0	0.210	9.2
		古浪河	古 浪			<0.0548>		<0.0371>		0.133	
		小 计		8.39	5.2	0.4815	5.7	0.6982	8.2	2.020	24.1
	合 计			86.34	53.8	5.4477	6.3	7.7585	9.0	6.195	7.2
内陆湖和柴达木水系	内陆湖	哈拉湖		7.83	4.9	0.5456	7.0	0.3504	10.9	<0.116>	
		青海湖北部	布哈河口刚察	20.74	12.9	1.8182	8.7	2.5823	12.5	1.504	7.2
		小 计	哈尔盖	28.57	17.8	2.3638	8.3	3.4332	12.0	1.620	5.7
	柴达木水系	哈尔腾河	花 海	26.81	16.7	3.6816	13.7	4.3295	16.1	0.4607	4.0
		鱼卡河	鱼 卡							0.1820	
		塔塔楼河	小柴旦							0.1252	
		巴音河	泽林沟							0.3819	
	小 计			26.81	16.7	3.6816	13.7	4.3295	16.1	1.0598	4.0
	合 计			55.38	34.5	6.0454	10.9	7.7627	14.0	2.680	4.8
黄河水系	湟 水	大通河	天堂寺	18.80	11.7	1.4285	7.6	1.9335	10.6	0.7665	19.1
		北川河	桥 头							0.7617	
		湟水上游	海 晏							0.0591	
合 计			18.80	11.7	1.4285	7.6	1.9335	10.6	3.5863	19.1	
祁连山区总计				160.52	100	12.9216	8.0	17.5047	10.9	12.461	7.8
全国总计				3451.80	4.7					225.70	5.0

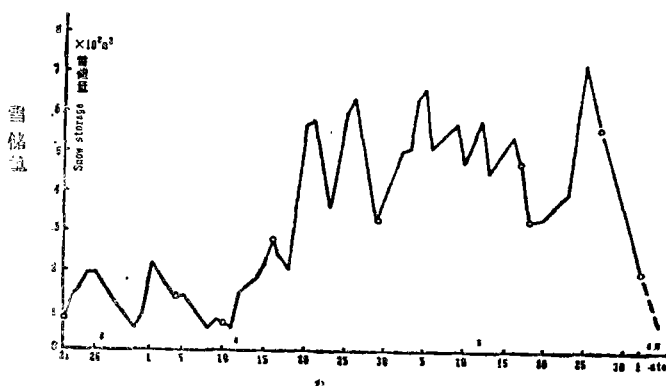


图 8 1987年3月21日至6月1日河西内陆河流域逐日雪储量时间曲线, 图中绘圈者为根据卫星资料估算的值, 其余是用气象站降雪资料推算的值
Time series of daily snow storaye of Hexi continental river basins during March 21—June 1, 1987. Two methods, based on satellite data (values show on the diagram as circles) and daily snowfall at weather stations (the others), were adopted.

致谢: 卫星气象中心陈维英和肖乾广同志提供CCT带加工的二级产品, 黄蕾诺同志参加部分统计工作, 作者深表谢意。

参 考 文 献

- (1) Christopher L Brest and willian B Rossow. Radiometric monitoring and Calibration of NOAA AVHRR Channel 1 data. Proceedings of the International Radiation Symposium, Lille, France: 18—24 August, 1988, 245—247.
- (2) 陈乾等. 用AVHRR资料反演祁连山区积雪参量. 冰川冻土, 1990, 12 (4).
- (3) 李培基等. 中国积雪分布. 冰川冻土, 1983, 5 (4)
- (4) Martinee J. Expected snow loads on structures from incomplete hydrological data. J. Glaciol. 1977, 19 (81): 185—195
- (5) Hall D.K. and Martinee J. Remote sensing of Ice and snow. Chapman and Hall Ltd. publication, 1985, 27—29
- (6) LiPeiji. Seasonal snow resources and their fluctuations in China. Large-Scale Effects of Seasonal Snow cover, IAHS Publication, 1987, (166): 93—104
- (7) 王健. 祁连山黑河流域的积雪分布. 兰州冰川冻土所集刊, 科学出版社, 1988 (6) 55—

CLIMATICAL ANALYSIS OF SEASONAL SNOW RESOURCES IN QILIAN MT.

Chen Qian Chen Tianyu

(Lanzhou Institute of Arid Metecrology)

Subject term: Snow resources, Qilian Mt.

Abstract

This study is based on data of daity depth and density of snow cover and snow days recorded at 26 meteorological observing stations from 1951 to 1988 in Qilian Mt. region and snow cover parameters retrievals from ANHRR during October 1986 to June 1988. The space distributions, seasonal and annual variations of days, Maen depth, cumulative daily depth and denslty of snow cover have been analyzed and snow water resources have been estimated. In all of Qilian Mt. region the mean annual amount of snowfall is $160.5 \times 10^8 \text{m}^3$, whereas the mean spring(April to May)snow water storage and snowmelt runoff (late-March to early-June)are estimated to be $17.5 \times 10^8 \text{m}^3$ and $12.5 \times 10^8 \text{m}^3$, respectively. They account for 10.9% and 7.8% of the mean annual snowfall, respectively. It is indicated that consumptions of evaporations and infiltrations make up 92% of the annual amount of snowfall.