

天山乌鲁木齐河源1号冰川重力 测厚资料的重新解释

曾仲巩

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

1981年我们分别用雷达、地震、重力勘探测定了天山乌鲁木齐河源1号冰川的厚度。1982年试验热水钻时,在东支冰川C'-D'剖面间布置了钻孔,钻深达109.90米,推测下部还有2—3米的冰夹石。根据此钻孔的初步检验,雷达资料与实际冰厚较为吻合,而重力测量厚度偏小30—40米。为此我们对重力资料重新进行了检查分析。

一、厚度数据偏小的原因分析

重力测量的误差可来自野外工作方法、异常计算及解释方法。经检查发现,工作中在重力基点选择,岩石密度取值,冰川厚度展算上都不同程度地存在问题。特别是D剖面重力基点选取不当,使重力异常绝对值偏小;采用简单无限平板公式展算冰厚,对其误差估计不足也是一个重要原因。

1. 岩石密度取值偏大

岩石密度(σ)是计算重力异常、展算冰厚不可缺少的数据。岩石密度值偏大,使布伽改正值($=0.3086h-0.0426h$)偏小,而地形改正值($\alpha\sigma$)偏大,因之算得的布伽异常可偏大或偏小;另一方面,也使冰-岩密度差 $\Delta\sigma$ 变大,而冰厚一般与密度差成反比关系(如用无限平板公式展算,则冰厚 $h=\Delta g/2\pi f\Delta\sigma$, $\Delta\sigma$ 大,所求得的冰厚必然偏小。综合这二方面的影响,取不同密度试算可以得出,在1号冰川的具体情况下,密度取值大0.1克/厘米³,相应冰厚减小2—4米。

工作中各种岩石的密度是用排液法测定的。标本重200克以上,称重用药物天平,精确到1克;排出水用量筒量体积,估读到1毫升,因此测试误差应在0.1g/cm³以内。其可能误差是岩块中孔隙吸收水分,使排出水体积小于标本体积,因而密度偏高,密度资料整理采用算术平均,取值为2.6g/cm³。在冰厚计算时,虽然考虑了各种因素,分别取2.5、2.6、2.7g/cm³进行了对比计算,但从重新整理的五种标本的岩石密度分布曲线(图1)可见,取 $\sigma=2.6\text{g/cm}^3$ 似乎偏高,测区内岩石密度最可几分布应为2.5g/cm³。进一步考虑岩石表层的风化以及冰川堆积物发育,岩石颗粒间的大小孔洞以及岩体内的构造节理、裂隙都使岩石真正密度小于标本块的密度。虽然在地层压力下岩

石密度随深度可能增大,但对0—200米的浅层来说前者引起的密度降低应为主导因素,因此在资料整理与计算中取 $\sigma = 2.1\text{g/cm}^3$ 看来比较合理。

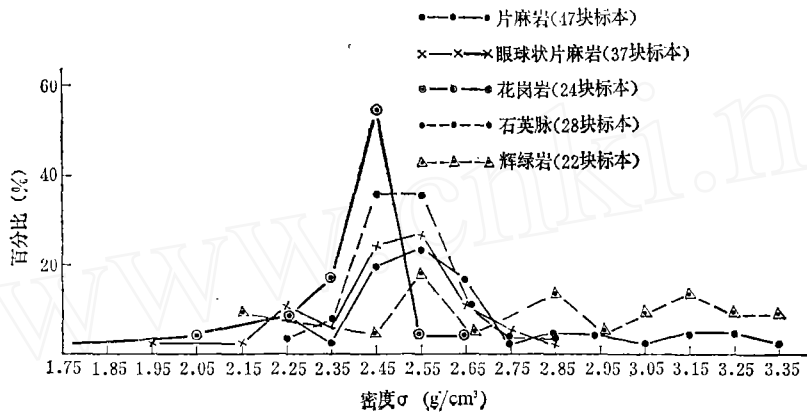


图1 岩石标本密度分布图

Fig. 1. Density distribution of rock samples

2. 重力基点选择

重力基点是重力异常的起算点,它应选在不受探测体重力异常影响的正常场内。基点选在冰川附近,会受到冰川所引起的负异常的影响,致使计算的重力异常绝对值偏小,相应计算的冰川厚度减少。冰川地区开展重力工作在选择基点时往往遇到实际困难——冰川谷两侧地形陡峭,难以攀登和摆架仪器;基点选得太远,在作重力测量时不能在规定时间内闭合回到基点。实际工作中有时为了使重力剖面测量在规定的仪器线性所允许的范围内闭合,把重力基点选在重力剖面一端的冰川谷侧壁上,这种选择是很勉强的,它可能使所测量的重力异常减小到不允许的程度,造成推断冰川厚度很大的误差。此次工作中B、C二剖面我们选冰川北侧100米处的基Ⅲ为基点,此处冰川宽度 $2a_1 = 400$ 米。假定冰川厚度 $h = 30$ 米, $\Delta\sigma = 2.4 - 0.9 = 1.5\text{g/cm}^3$,用垂直脉公式计算冰川在基点的异常,其值 $\Delta g = -0.072\text{mgal}$ (毫伽),即表明由于所选重力基点靠近冰川,使所测得的B、C剖面重力异常减小 0.072mgal 左右,相应冰厚偏小1米左右,对异常测量和冰厚推算未造成显著影响。D剖面基点 D_{10} 距冰川西缘仅10米,此处冰川宽度为 $2a_1 = 600$ 米,若设冰川平均厚度为50米,同样用垂直脉公式可求得基点处的 $\Delta g = -1.008\text{mgal}$,而根据解释所得冰川剖面用 Δg 量板计算,基点处的 $\Delta g = 0.90\text{mgal}$,D剖面实测最大异常为 -5.334mgal 。这就是说,由于基点选择不当,D剖面重力异常约减小 $1/6$,由于各测点重力异常减小约1毫伽,相应推断的冰川厚度偏小十米以上,无论其绝对值还是相对值都是不可忽略的。

附带指出,巴托拉冰川考察重力测厚工作中也存在由于基点选择不当给解释造成大误差(不允许误差)的问题。例如根据资料[1],在Ⅲ剖面,基点 G_1 距冰川约100米,冰川宽度 $2a_1 = 1200$ 米, $\Delta\sigma = 2.7 - 0.9 = 1.8\text{g/cm}^3$,按解释结果,可取平均冰川厚度为150米,用上而指出的垂直脉公式计算,得 $\Delta g = -1.403\text{mgal}$,说明由于基点选择太靠近冰川,

使异常减小约 1.4 毫伽, 推断厚度相应减小约 20 米。在 X 剖面上, 基点 G_1 相距冰川小于 100 米, 而 $2a_1 = 2400$ 米, 若取 $h = 300$ 米进行计算, 得 $\Delta g = -5.786 \text{ mgal}$, 可见由于基点选择的影响, 该剖面冰川厚度减小 80 米以上。原推算该剖面最大冰厚 431.7 米, 如果经过这项改正, 该剖面上最大冰厚超过 500 米是完全可能的。进一步若考虑下面将要讨论的解释方法方面的问题, 该剖面的最大冰厚度甚至可能超过 600 米。

3. 解释方法问题

由重力异常反演异常体厚度, 现有的各公式只适用于规则几何形体, 实际地质体与规则几何形体之间只能是不同程度的近似, 因此推算厚度决定于近似程度不同而引起大小不等的误差。在国内过去的冰川重力测厚工作中, 包括此次天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的重力工作, 在推算冰川厚度时都将冰川视作无限平板体, 按公式 $h = \Delta g / 2\pi f \Delta \sigma$ 进行计算。实际上冰川长、宽有限, 对山谷冰川而言, 随着冰川厚度与冰川长宽比值的增大, 解释厚度就减小。另外对于山谷冰川, 在横剖面 (即重力剖面方向) 上冰床地形有较大的起伏, 冰厚相对有较大的变化, 因此用平板公式只能求得“视平均厚度”, 此“视平均厚度”往往不等于冰川的真正厚度。在冰厚度的最大点上, 它小于冰川的实际最大厚度。而重力剖面的两端即冰川两侧可能更加偏小, 极端情况下求得的厚度可能只有实际厚度的一半 (若剖面上冰厚度不变, 在冰川侧端的重力点上可把冰川视作垂直台阶, 冰川厚度应为 $h = \Delta g / \pi f \Delta \sigma$, 而套用无限平板公式 $h = \Delta g / 2\pi f \Delta \sigma$)。解释方法上理论与实际之间存在的这种差距使简单理论公式推断的冰川厚度精度不可能很高, 而且在大多数情况下推断厚度一般偏小。

二、冰川厚度的重新计算

根据上面分析所指出的问题, 我们对 1 号冰川厚度重新进行了推算。首先在资料整理与解释时, 岩石密度取值改为 $\sigma = 2.4 \text{ g/cm}^3$, 相应 $\Delta \sigma = 2.4 - 0.9 = 1.5 \text{ g/cm}^3$, 由于 D 剖面重力基点 D_1 选择不当已无法弥补, 但上面的分析却已指出, 它使该剖面异常绝对值系统性地减小约 1 毫伽, 对应厚度减小约 15 米左右。

推算冰川厚度除用平板公式外, 还采用了用三个垂直脉迭加 (近似实际冰川) 求取冰川最大厚度的方法和选择法 (表 1 及图 2—4)。

三个垂直脉迭加近似冰川求剖面中段冰川最大厚度方法示意如图 5。因 0 点附近, 有 $\Delta g \approx \Delta g_{CEHF} + \Delta g_{ABKI} - \Delta g_{CDGF}$, 根据用无限平板公式推算结果, 我们可以选择剖面两端的冰厚 h' , 而假定不同的冰厚 h , 按垂直脉公式求上述三个脉状体的异常 Δg , 与实测 Δg 异常最接近的 h 即为剖面中段的冰川厚度。因为此法考虑了剖面中部冰厚而两侧冰薄的实际情况, 因而求得的剖面中段冰川厚度应比用无限平板公式求得的冰川厚度接近于实际厚度。

选择法是根据上述两种方法并参考雷达剖面测量的结果, 假定冰川厚度剖面用 Δg 量板计算重力异常并与实测异常对比, 如果它们之间的差别很大, 就修改原来所假定的剖面, 然后重新计算, 直到二者的差别在允许的误差范围内^[2]。选择法解释考虑了整条剖面

表1 重力点布伽
Table 1. Computation of Bouguer anomaly of

测 点 号	与 基 _{BC} 纵 坐 标 差 (m)	海 拔 高 程 (m)	与 基 _{BC} 高 程 差 Δh (m)	观 测 重 力 值 (mgal)	纬 度 改 正 值 (mgal)	布伽改正值(mgal)			地形改正
						σ	σ	σ	σ
						取 2.3 g/cm ³	取 2.4 g/cm ³	取 2.5 g/cm ³	取 2.3 g/cm ³
B ₁₀	105	3799.7	-39.9	7.253	0.085	-8.468	-8.301	-8.134	-0.403
11	153	3806.2	-33.4	5.602	0.124	-7.088	-6.949	-6.809	-1.090
12	195	3807.7	-31.9	4.569	0.158	-6.770	-6.636	-6.503	-1.343
13	235	3807.6	-32.0	4.907	0.190	-6.791	-6.657	-6.523	-1.463
14	276	3808.3	-31.3	4.539	0.224	-6.643	-6.512	-6.381	-1.524
15	317	3811.0	-28.6	4.045	0.257	-6.070	-5.950	-5.830	-1.479
16	357	(3816.0)	-23.6	3.303	0.289	-5.009	-4.910	-4.811	-1.456
17	377	(3817.4)	-22.2	2.771	0.305	-4.712	-4.618	-4.525	-1.493
C ₁₀	157	3843.9	4.3	-1.853	0.127	0.913	0.895	0.877	-0.913
11	180	3844.6	5.0	-2.584	0.146	1.061	1.040	1.019	-1.194
12	215	3848.3	8.7	-3.815	0.174	1.846	1.810	1.773	-1.566
13	240	3849.4	9.8	-4.396	0.194	2.080	2.039	1.998	-1.737
14	273	3848.3	8.7	-4.182	0.221	1.846	1.810	1.773	-2.254
15	310	3848.0	8.4	-4.382	0.251	1.783	1.748	1.712	-2.309
16	335	3846.2	6.6	-3.996	0.271	1.401	1.373	1.345	-1.881
17	368	3843.8	4.2	-3.350	2.298	0.891	0.874	0.856	-1.840
18	400	3843.4	3.8	-3.217	0.324	0.806	0.791	0.775	-1.724
19	440	3845.4	5.8	-3.385	0.356	1.231	1.207	1.182	-1.546
D ₁₀	0	3897.5	0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	21	3890.8	-6.7	0.546	0.017	-1.422	-1.394	-1.366	-1.097
12	43	3893.3	-4.2	-0.801	0.035	-0.891	-0.874	-0.856	-1.581
13	58	3895.2	-2.3	-2.033	0.047	-0.488	-0.478	-0.469	-1.806
14	75	3895.5	-2.0	-2.532	0.061	-0.424	-0.416	-0.408	-1.921
15	93	3894.5	-3.0	-2.334	0.075	-0.637	-0.624	-0.612	-2.121
16	115	3896.1	-1.4	-2.656	0.093	-0.297	-0.291	-0.285	-2.187
17	138	3896.5	-1.0	-2.932	0.112	-0.212	-0.208	-0.204	-2.210
18	153	3896.4	-1.1	-2.588	0.124	-0.233	-0.229	-0.224	-2.154
19	175	3897.2	-0.3	-2.313	0.142	-0.064	-0.062	-0.061	-1.953
20	193	3901.2	3.7	-2.708	0.156	0.785	0.770	-0.754	-1.780
21	213	3911.0	13.5	-4.394	0.173	2.865	2.809	2.752	-1.478

异常及冰川厚度计算表

gravity stations and glacier thickness

值(mgal)		布伽异常值(mgal)			无限平板公式计算冰川厚度(m)			迭加法确定的 冰川最大厚度 (m)	选择法确定的 冰川厚度 (m)
σ 取 2.4 g/cm ³	σ 取 2.5 g/cm ³	σ 取 2.3 g/cm ³	σ 取 2.4 g/cm ³	σ 取 2.5 g/cm ³	σ 取 2.3 g/cm ³	σ 取 2.4 g/cm ³	σ 取 2.5 g/cm ³		
-0.420	-0.438	-1.533	-1.383	-1.234	26.12	22.00	18.40	19	
-1.138	-1.185	-2.452	-2.361	-2.268	41.78	37.56	33.82	38	
-1.402	-1.460	-3.386	-3.311	-3.236	57.70	52.68	48.25	59	
-1.526	-1.590	-3.157	-3.086	-3.016	53.80	49.10	44.97	66	
-1.590	-1.656	-3.404	-3.339	-3.274	58.00	53.12	48.82	69	
-1.543	-1.608	-3.247	-3.191	-3.136	55.33	50.77	46.76	65	
-1.519	-1.583	-2.873	-2.837	-2.802	48.96	45.14	41.78	71	
-1.558	-1.623	-3.129	-3.100	-3.072	53.32	49.32	45.80	74	
-0.953	-0.993	-1.726	-1.784	-1.842	29.41	28.38	27.46	29	
-1.246	-1.298	-2.571	-2.644	-2.717	43.81	42.07	40.51	45	
-1.634	-1.703	-3.361	-3.465	-3.571	57.27	55.13	53.24	64	
-1.812	-1.888	-3.859	-3.975	-4.092	65.76	63.24	61.01	78	
-2.352	-2.450	-4.369	-4.503	-4.638	74.45	71.64	69.15	86	
-2.410	-2.510	-4.657	-4.793	-4.929	79.36	76.26	73.49	89	
-1.963	-2.045	-4.205	-4.315	-4.425	71.65	68.65	65.98	91	
-1.920	-2.000	-4.001	-4.098	-4.196	68.18	65.20	62.56	88	
-1.799	-1.874	-3.811	-3.901	-3.992	64.94	62.06	59.52	85	
-1.613	-1.680	-3.344	-3.435	-3.527	56.98	54.65	52.59	72	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0	
-1.145	-1.193	-1.956	-1.976	-1.996	33.33	31.44	29.76	32	
-1.650	-1.719	-3.238	-3.290	-3.341	55.18	52.34	49.81	61	
-1.884	-1.963	-4.280	-4.348	-4.418	72.93	69.18	65.87	85	
-2.004	-2.088	-4.816	-4.891	-4.967	82.06	77.82	74.06	109	
-2.213	-2.305	-5.017	-5.096	-5.176	85.49	81.08	77.17	130	
-2.282	-2.378	-5.047	-5.136	-5.226	86.00	81.71	77.92	130	
-2.306	-2.403	-5.242	-5.334	-5.427	89.32	84.86	80.92	130	
-2.248	-2.341	-4.851	-4.941	-5.029	82.66	78.61	74.98	130	
-2.038	-2.123	-4.188	-4.271	-4.355	71.36	67.95	64.93	88	
-1.858	-1.935	-3.547	-3.640	-3.733	60.44	57.91	55.66	64	
-1.542	-1.606	-2.834	-2.954	-3.075	48.29	47.00	45.85	47	

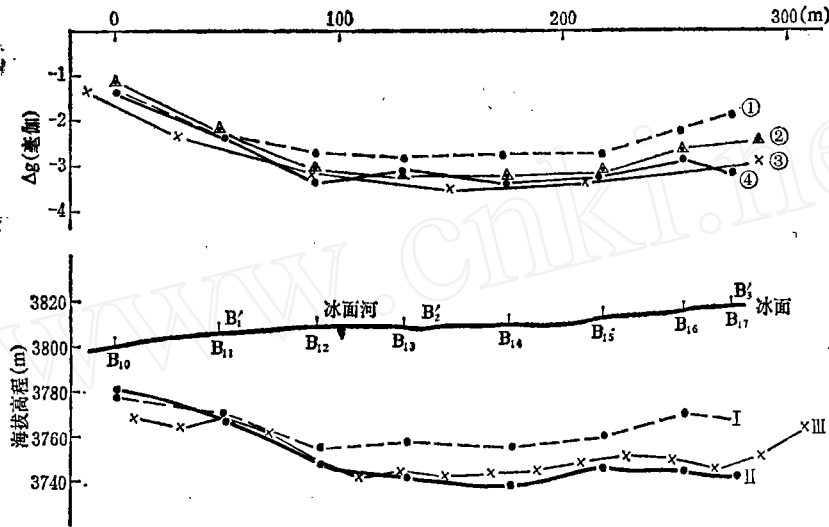


图2 B剖面重力异常及解释图

Fig. 2. Gravity anomaly of B profile and its interpretation

①平板公式计算的 Δg ; ②选择法计算的 Δg ; ③雷达测量的 Δg ; ④实测的 Δg
 I 平板公式确定的冰床; II 选择法确定的冰床; III 雷达测量的冰床(图3、4同)

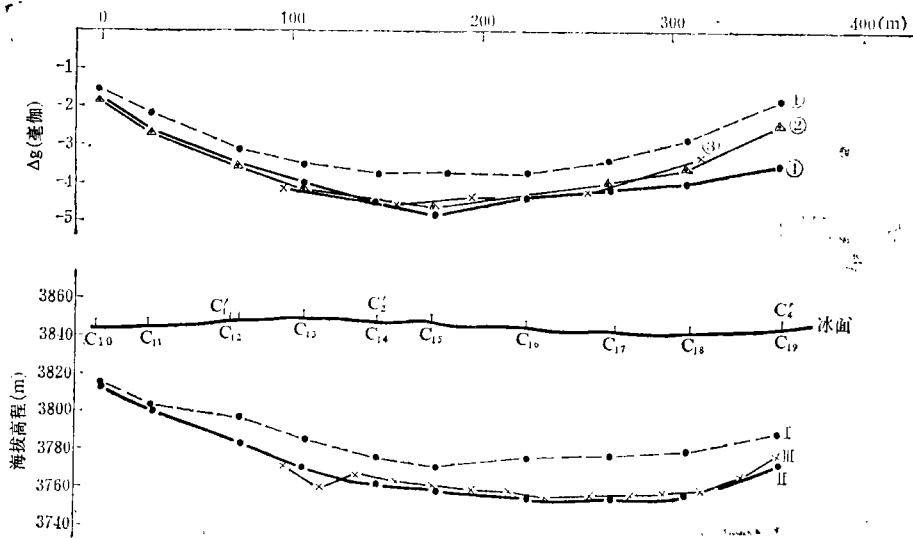


图3 C剖面重力异常及解释图

Fig. 3. Gravity anomaly of C profile and its interpretation

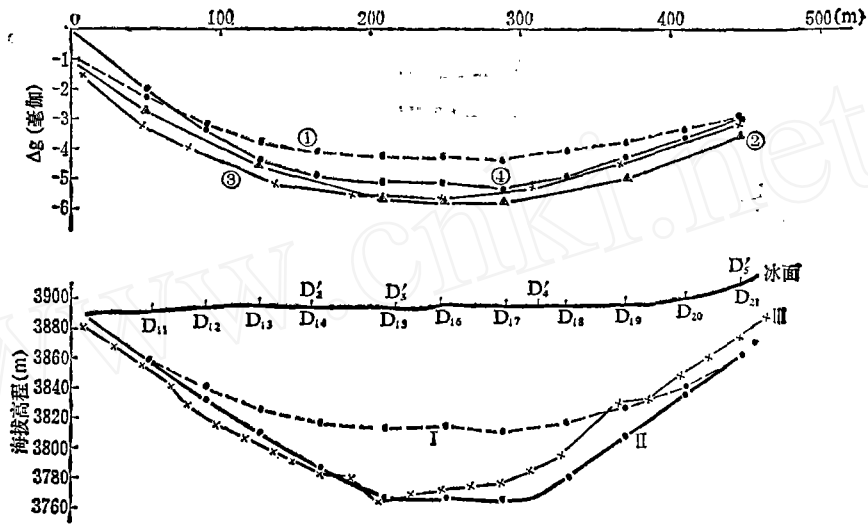


图 4 D剖面重力异常及解释图

Fig. 4. Gravity anomaly of D profile and its interpretation

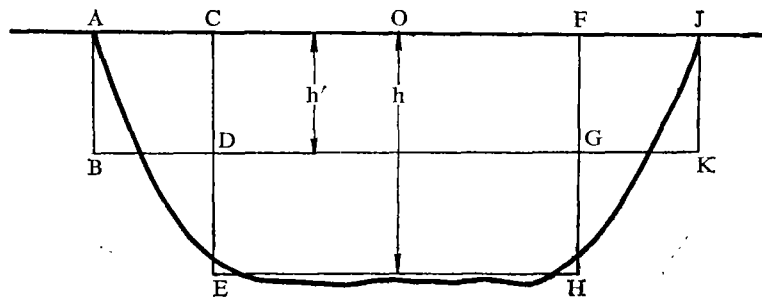


图 5 垂直脉迭加所求最大冰厚示意图

Fig. 5. Sketch of the maximum ice thickness determined with the stack method of vertical veins

的冰川厚度变化，而公式计算求冰川厚度只根据被解释点的重力值，因此选择法的结果理应更接近于实际的冰川厚度，在几种解释方法中它的结果是最为可靠的。

从最后得到的冰川剖面可以看出B、C剖面冰床比较平坦，最大冰川厚度分别为70、90米左右；D剖面谷床为U形状，最大冰厚在130米左右。这个结果与目前的验证能够吻合。

参 考 文 献

- [1] 苏 珍、张祥松、顾钟炜, 1980年, 巴托拉冰川的厚度测定和冰量计算, 喀喇昆仑山巴托拉冰川考察与研究, 42—56页, 科学出版社。
- [2] 北京地质学院编, 1961年, 重力勘探, 中国工业出版社。

(本文于1983年9月15日收到修改稿)

A Reassessment on the Thickness of Glacier No.1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan by Gravimetry

Zeng Zhonggong

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Academia Sinica)

Abstract

With the help of boring hole materials, check-up on the thickness data of the Glacier No.1 at the head of Urumqi river in 1981 by gravimetry was done. Meanwhile, the influence of the acceptable value of rock density, of the selection of gravity base points and of the methods for the interpretation of data on the error of measurements were analysed, which might be useful for the work of gravimetry surveying on alpine glaciers and for the evaluation of data.

In this paper, three methods (the formula of infinite plate, the stack method with three vertical veins and the selection method) were used for the calculation of glacial thickness including the landforms of ice bed of three profiles. Results show that the maximum glacier thickness at profiles of B, C and D was about 70 m, 90 m and 130 m respectively, relatively close to the data of boring holes.