

天山冰川厚度及其储量计算

苏 珍 丁良福 刘潮海

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

天山是我国现代冰川主要分布区之一。天山冰川的融水对天山南北广大的农田灌溉,起着极为重要的作用,素有高山固体水库之称。为了估算这些固体水库的储量,必须了解冰川的厚度,选择不同类型的冰川,用雷达法和重力法进行冰川厚度的测定,并由此建立了推算天山冰川厚度的公式,对天山冰川的储水量进行计算,以便供大家参考使用。

一、冰川概况与形态类型

天山的现代冰川,据1983年最新冰川编目统计,共有现代冰川8904条,冰川面积9194.97平方公里*。由于天山深居内陆干旱区,冰川的发育主要依赖高大的山体提供的低温条件,因而与世界同纬度高山冰川有很大的差别,表现为冰川雪线高,气温低,降水少,冰川作用能低,运动速度慢,冰内温度低,消融较弱,进退幅度与波动次数少,地质地貌作用微弱等方面。天山东段和中段的冰川,具有明显的大陆性冰川特征,规模一般较小,厚度不大,冰面洁净且平坦;天山西段的冰川,具有亚大陆性冰川特征,规模较大,厚度也较大,冰面多起伏不平,表碛发育。

天山冰川面积结构的特点是:大型冰川数量少,但所占面积大;小型冰川数量多,但所占面积小。面积在20平方公里以上的大型冰川共42条,只占全部冰川条数的0.46%,但其面积达2812.83平方公里,占全部冰川面积的30.6%;而小型冰川(面积小于1平方公里)占全部冰川条数的83.11%,面积占全部冰川面积的22.93%。平均每条冰川面积为1.033平方公里,比祁连山冰川(平均面积0.69平方公里)约大1.49倍(表1)。

表1 中国天山冰川面积结构统计表

冰川面积级数 (平方公里)	冰川条数	%	冰川面积 平方公里	%
<1.0	7400	83.11	2108.58	22.93
1.01—5.0	1260	14.15	2499.61	27.18
5.01—10.0	151	1.71	1063.74	11.57
10.01—20.0	51	0.57	710.21	7.72
>20.01	42	0.46	2812.83	30.60

• 据刘潮海、谢维荣、丁良福、赖祖铭、王银生等统计。

冰川面积的大小与冰川形态类型有关。天山现代冰川的形态各不相同,一般可分为:悬冰川、冰斗冰川、山谷冰川及平顶冰川等,以及它们之间的过渡类型的冰川(表2)。

表2

中国天山冰川形态类型统计表

冰川类型	冰川条数		冰川面积	
	条数	%	平方公里	%
山谷冰川	395	4.44	4422.44	48.10
冰斗——山谷冰川	426	4.78	1251.19	13.61
冰斗冰川	1665	18.70	1889.28	20.55
冰斗——悬冰川	1228	13.79	661.59	7.19
悬冰川	5171	58.08	935.13	10.17
平顶冰川	19	0.21	35.34	0.38

1、悬冰川是附着在山坡上的一种小型冰川。在天山,这类冰川的面积最小,一般多在0.5平方公里以下,数量最多,达5171条,占全部冰川条数的一半以上,分布很广。

2、冰斗冰川是发育在河流源头凹地中的冰川,凹地后壁明显而陡峻,斗底平缓,出口窄小,有时形成短促的冰舌。天山的这类冰川较多,有1665条,占全部冰川数量的18.7%,面积较小,一般在1平方公里左右,分布较广。

3、山谷冰川是各类冰川中规模最大的一种冰川类型,这种冰川有明显的粒雪盆和冰舌,冰舌伸展长度等于或大于粒雪盆的长度。天山的这类冰川只有395条,占全部冰川条数的4.44%,面积达4422.44平方公里,约占全部冰川面积的近一半,每条冰川的面积平均在11平方公里以上。

4、平顶冰川是发育在平坦山顶或平缓山脊上的冰川。冰川形态基本上重复下伏地形,在它的边缘面临谷地处才形成短小冰舌。天山这类冰川仅有19条,占全部冰川条数的0.21%,面积多在1平方公里以上,主要分布在天山东段。

5、过渡类型的冰川即有冰斗——悬冰川和冰斗——山谷冰川。冰斗——悬冰川是介于冰斗冰川与悬冰川之间的过渡冰川,在天山这类冰川分布较广,有1228条,占全部冰川条数的13.79%,面积均在1平方公里以下。冰斗——山谷冰川是介于冰斗冰川与山谷冰川之间的过渡型冰川,其规模仅次于山谷冰川,它除有明显的粒雪盆外,冰舌已伸展到谷地,但冰舌长度小于粒雪盆长度。这类冰川在天山数量不多,共426条,占全部冰川条数的4.78%,面积均在1平方公里以上,平均2.9平方公里。

二、天山冰川厚度的测定

为了解天山冰川的厚度,选择了六条山谷冰川、五条冰斗冰川、一条悬冰川、一条平顶冰川及三条冰斗——悬冰川等不同形态类型的冰川,用我所自制的B—1型冰川测厚雷达和

北京地质仪器厂制造的ZS 2—67型石英弹簧重力仪进行了冰川厚度的测定^{*** (2)}。测定情况及结果如表3。

1、山谷冰川的厚度

由于山谷冰川规模大,所以冰川厚度测定的剖面布置上,多横贯冰舌。测定结果:天山一般山谷冰川冰舌前端的冰层厚度在数十米左右,规模巨大的复式山谷冰川,冰舌冰层厚度多在100米以上,如西琼台兰冰川在距冰舌末端13公里处的中段剖面,平均冰层厚度为229米,最大厚度可达301.7米。由此推断,山谷冰川上游的冰层厚度将更大。

2、冰斗冰川的厚度

冰斗冰川的规模一般较小,测点不仅布置有多条横剖面,而且还沿冰川主流线布有纵剖面。测定结果,天山冰斗冰川的最大厚度一般在百米左右,平均厚度在30—70米之间。如乌鲁木齐河源1号冰川厚度,冰舌末端中部的冰层最大厚度28米,向上逐渐增至数十米厚;粒雪盆内冰层厚度由周围的数十米向中部逐渐加厚,西支粒雪盆冰层最大厚度为139米,东支粒雪盆冰层最大厚度为137米,整个冰川平均冰层厚度为55米。

3、悬冰川的厚度

悬冰川的规模最小,冰川厚度测定的剖面一般有1条横贯冰川或纵横2条剖面就完全可以。测定结果,这类冰川的边缘冰层一般只有10多米厚,向中部冰层逐渐加厚,最大厚度也有数十米。

4、平顶冰川的厚度

平顶冰川的规模一般与山顶面的大小和高度有关。若山顶面积大、海拔高,则平顶冰川的面积大,反之则小。由于平顶冰川的冰床平坦,因而冰层厚度的分布也比较均一,一般有一条纵剖面就可以了解整个冰川的厚度。测定结果,这类冰川的最大冰层厚度为数十米至百多米。如哈尔里克山南坡的喀尔勒克塔冰川,平均冰层厚度60多米,最大厚度78米。

5、过渡类型冰川的厚度

冰斗——山谷冰川的规模较大,数量不多,冰川厚度在冰舌段一般为数十米至百多米,上段至粒雪盆内冰层最大厚度多在百米以上;冰斗——悬冰川规模小,冰川厚度不大,一般多在百米以内。如乌鲁木齐河源3号冰川周围只有10多米厚,向中心厚度逐渐增大,在粒雪区中部冰层最厚也只有48米。

从上可看出,冰川厚度的大小,主要取决于冰川的规模、形态类型以及测定冰川厚度的部位。从冰川规模和形态类型来看,冰川厚度最大的是山谷冰川,次为冰斗——山谷冰川,中等厚度的冰层是平顶冰川和冰斗冰川,最小的是悬冰川和冰斗——悬冰川。从冰川不同部位的冰层厚度看,冰舌中部比两侧大,冰舌上段比中下段大,粒雪盆中心较后壁周围大。

• 黄以职、朱国才:天山地区雷达测厚报告,1982.3。

• 钱嵩林、沈颖:乌鲁木齐河源冰川的雷达测厚,1981年天山冰川观测站年报。

表 3 天山不同类型冰川厚度的测定

冰川名称或冰川编号	冰川位置 (流域或山脉)	冰川类型	冰川朝向	长度 (公里)	面积 (公里) ²	末端高 度(米)	冰厚度 剖面及位置	剖面平均 厚度(米)	剖面最大 厚度(米)	测量者	测量 方法
喀藏塔布迪	哈尔里克山 南坡	山谷冰川	西南	6.5	6.59	3595	冰舌下段3890米处		105	朱国才 黄以职	雷达法
5 Y741C48	依连哈比尔朵 北坡	"	北西	5.1	6.07	3250	冰舌下段3610米处		137	"	"
图拉苏	托木尔峰区	"	北东	4.8	9.05	3140	冰舌末端附近		42	"	"
科契卡尔	"	复式山谷冰川	南	26.0	83.56	3060	冰舌下段3400米处 冰舌前段3100米处		110 80	"	"
木扎尔特	"	"	西	33.0	137.7	2770	冰舌中段3490米		106	"	"
西琼台兰	"	"	南东	23.8	165.38	3084	从冰舌末端3150 米处至中段五剖面	53,102,17 8,184,229	83,121,25 8,235,301	苏 珍	重力法
乌鲁木齐河 1号	喀拉乌成山 北坡	双冰斗冰川	北东	2.2	1.94	3740	横剖面 14 条 纵剖面 2 条	55	139	钱嵩林 沈 颖	雷达法
乌鲁木齐河 2号	"	冰斗冰川	北	1.8	0.97	3660	纵横剖面各 1 条		89	"	"
乌鲁木齐河 6号	"	"	东	1.5	0.65	3750	"		96	"	"
5 Y741C53	依连哈比尔朵 北坡	双冰斗冰川	北东	1.7	1.48		横剖面 2 条 纵剖面 1 条		90	朱国才 黄以职	"
5 Y741C51	"	"	东	2.7	1.8		纵剖面 1 条		75	"	"
乌鲁木齐河 4号支	喀拉乌成山 北坡	悬冰川	北西		0.3	3850	横剖面 1 条		30	钱嵩林 沈 颖	"
喀尔勒克塔	哈尔里克山 南坡	平顶冰川	南西	2.4	3.45	3960	纵剖面 1 条	62	78	朱国才 黄以职	"
乌鲁木齐河 3号	喀拉乌成山 北坡	冰斗—悬冰川	北	0.9	0.64	3630	横剖面 2 条		48	钱嵩林 沈 颖	"
乌鲁木齐河 4号	"	冰斗—悬冰川	北西	1.0	0.63	3700	"		44	朱国才 黄以职	"
5 X043N 8	依连哈比尔朵 南坡	"	北东	1.4	0.46		纵横剖面各 1 条		58	"	"

三、冰川平均厚度与冰川面积的关系

冰川厚度与冰川规模的大小关系比较密切，瑞士冰川编目工作者，在编阿尔卑斯山冰川目录时，他们利用所测定的冰川冰层厚度计算出冰川的平均厚度，然后找出冰川平均厚度与冰川面积的关系式： $\bar{H} = 5.2 + 15.4\sqrt{F}$ ，式中 $\bar{H}$ 为冰川的平均厚度， F 为冰川面积，5.2和15.4为选用的系数，上述公式所反映的冰川平均厚度与冰川面积之间的关系为抛物线⁽³⁾。它解决了每条冰川平均厚度和冰川储量。

我们利用上述方法，对我国天山冰川平均厚度与冰川面积之间的关系式进行了推导。对所测定的冰川逐条计算出冰川的平均厚度（表4），然后以冰川的平均厚度和冰川面积数作纵横座标，找出相关曲线（图1），并根据相关曲线计算出天山冰川平均厚度与冰川面积的

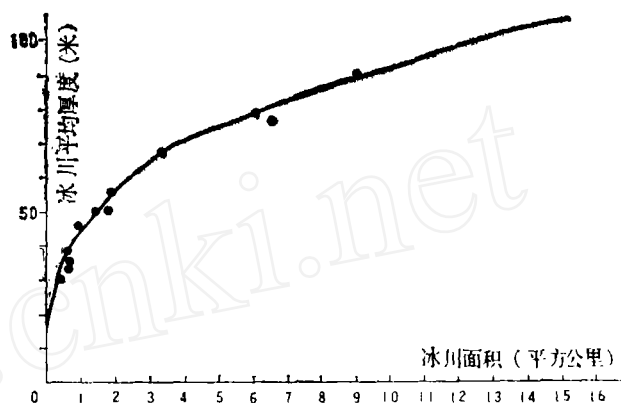


图1 天山冰川平均厚度（ $\bar{H}$ ）与冰川面积（ F ）的关系

表4

冰川编码	冰川名称	冰川类型	冰川面积 (平方公里)	冰川平均厚度 (米)
5 x043n 8	哈希勒根南坡冰川	冰斗—悬冰川	0.46	30
5 Y730C25	乌鲁木齐河源4号	"	0.63	33
5 Y730C27	乌鲁木齐河源3号	"	0.64	35
5 Y822C 2	喀尔勒克塔	平顶冰川	3.45	67
5 Y741C51	哈希勒根3号	双冰斗冰川	1.8	50
5 Y741C53	哈希勒根1号	"	1.48	50
5 Y730C29	乌鲁木齐河源1号	"	1.94	55
5 Y730C28	乌鲁木齐河源2号		0.97	46
5 Y730C31	乌鲁木齐河源6号		0.65	38
5 Y674B28	西琼台兰冰川		165.38	227
5 Y681D24	木扎尔特		137.7	210
5 Y674A 5	科契卡尔		83.56	170
5 x046K50	图拉苏		9.05	88
5 Y741C48	哈希勒根最大冰川		6.07	77
5 Y822C 2	喀藏塔布迪		6.59	76

相关公式: $H = -11.32 + 53.21 F^{0.3}$

这个公式除冰川面积最小的悬冰川外, 其它形态类型的山岳冰川都适用。悬冰川因为面积小, 可以用祁连山区冰川平均厚度的计算公式⁽⁴⁾:

$$H = 34.4 F^{0.45}$$

根据计算与实测验证也适用于天山小面积冰川平均厚度的计算。

从国际冰川编目对冰川厚度的精度要求(表5), 我们按上述模式计算出的天山冰川的平均厚度, 与实际测定的冰川厚度相差很小。一般冰川面积在8平方公里以下的, 计算出的冰川平均厚度精度指标在3以下; 冰川面积在30平方公里以上的, 计算出的冰川平均厚度精度指标在4以下。

表5 冰川目录中冰川厚度的精度指标

指 标	厚度(%)
1	0 - 5
2	5 - 10
3	10 - 20
4	20 - 30
5	>30

四、天山冰川的平均厚度与冰储量

按上述模式计算, 天山冰川的平均厚度大致如下: 面积小于1平方公里的冰川, 平均厚度为27.5米; 面积1—5平方公里之间的冰川, 平均厚度为56.7米; 面积5—10平方公里之间的冰川, 平均厚度为85.1米; 面积10—20平方公里之间的冰川, 平均厚度为105.2米; 面积20平方公里以上的冰川, 平均厚度为229.4米。按冰川的形态类型来分, 悬冰川的平均厚度最小为18.9米, 冰斗冰川的平均厚度为52.0米, 山谷冰川的平均厚度最大为175.1米, 平顶冰川的平均厚度为66.1米, 过渡类型的冰川平均厚度在上述冰川类型之间, 即冰斗——悬冰川为35.4米, 冰斗——山谷冰川为75.3米。中国天山冰川总平均厚度为109.9米, 苏联天山冰川编目计算的总平均厚度为115米⁽⁶⁾, 两者比较接近, 天山比祁连山冰川平均厚度约大2.2倍(祁连山冰川平均厚度48.3米)。

中国天山冰川平均厚度的分布, 表现有如下一些特征: 1、冰川由东向西逐渐增厚。东段哈尔里克山, 巴里坤山和博格达山的冰川平均厚度为49.9米, 中段依连哈比尔尕等9条山脉冰川平均厚度为59.9米, 西段汗腾格里等8条山脉冰川平均厚度增至140米。因为我国天山的山势越向西高度越大, 大型山谷冰川越发育。2、南坡大于北坡。我国天山北坡冰川平均厚度为67.2米, 而南坡冰川平均厚度为127.0米。因为南坡冰川虽然数量少, 但规模大。南坡冰川条数只占天山冰川总条数的37.27%, 但冰川面积却略大于北坡。3、冰川平均厚度在不同朝向上的分布是: 朝向北、北东和北西的冰川占冰川总条数65.61%, 占总面积48.18%, 平均厚度一般在50—70米之间, 这里多发育中小型冰川; 朝向西的冰川, 占冰川总条数8.89%, 占总面积11.96%, 平均厚度达201.8米, 大型的山谷冰川较为发育; 朝向南东和东的冰川, 占冰川总条数14.01%, 占总面积26.24%, 平均厚度分别为172.3米与154.8米, 大中型冰川比较发育。

根据上述冰川平均厚度的计算方法与冰川编目量算的冰川面积资料进行计算, 中国天山冰川的冰储量为1010.6333立方公里(见表6), 折合成水量为9095.69亿立方米, 是祁连山冰川储水量(811.2亿立方米)⁽⁴⁾的17.38倍, 是丰富的水利资源。冰川储水量在各流域的分配见表7。

表6 中国天山冰川平均厚度与冰川储量

山脉名称	冰川条数	冰川面积 (平方公里)	冰川平均厚度 (米)	冰储量 (立方公里)	冰川编号
哈尔里克山	122	125.89	55.74	7.0177	5Y822C2
巴里坤山	57	29.91	38.51	1.1532	5Y821A3
博格达山	479	216.98	48.149	10.4474	5Y725B10
天格尔山	745	227.80	32.66	7.4419	5Y694J16
依连哈比尔尕山	1892	1422.04	66.35	94.3546	5Y738C52
博罗克努山	746	641.67	68.93	44.2305	5X043J12
那拉提山	117	65.59	42.67	2.7987	5Y693E4
霍拉山	229	97.33	35.72	3.4769	5Y686E4
艾尔宾山	368	220.23	50.71	11.1682	5Y695D15
阿拉沟山	51	18.12	34.29	0.6213	5Y811C27
科克铁科山	252	187.74	56.20	10.5510	5Y692F4
阿吾拉勒山	283	163.31	47.99	7.8370	5X043Q3
科古瑟山	34	4.17	18.56	0.0774	5Y744C8
别珍套山	305	164.17	44.08	7.2370	5Y746F3
阿拉套山	94	76.37	52.16	3.9834	5Y746G3
穆斯套岭	8	3.55	36.76	0.1305	5Y754C1
天山南脉	692	725.14	76.53	55.4949	5Y672B36
汗腾格里山	685	2808.99	202.55	568.9577	5Y673K1
哈尔克他乌山	1267	1773.78	91.88	162.9877	5Y681D24
比依克山	478	222.16	48.01	10.6663	5X045D25
总计	8904	9164.97	109.91	1010.6333	5Y673K1

表 7

中国天山各流域冰川储水量

流域名称	冰川条数	冰川面积 (平方公里)	冰川平均厚度 (米)	冰 储 量 (立方公里)	冰 川 储 水 量 (立方米)
伊吾河等	85	67.14	48.54	3.2591	2,933,190,000
庙儿沟等	94	88.69	55.38	4.9118	4,420,620,000
博格达北坡	213	91.50	45.90	4.2007	3,780,630,000
艾丁湖流域	352	164.04	47.07	7.7212	6,949,080,000
乌鲁木齐河	150	45.99	33.55	1.5428	1,388,520,000
头屯河	221	61.20	31.08	1.9025	1,712,250,000
呼图壁河	239	72.07	32.65	2.3533	2,117,970,000
塔西河	107	48.01	54.34	2.6091	2,348,190,000
玛纳斯河	800	608.25	64.22	39.0623	35,156,070,000
霍尔果斯河	247	224.64	78.07	17.5378	15,784,020,000
安集海河	225	204.78	84.00	17.2020	15,481,800,000
玛纳斯湖	8	3.55	36.76	0.1305	117,450,000
艾比湖流域	1104	823.06	57.76	47.5460	42,791,400,000
伊犁河流域	2373	2022.06	70.29	142.1791	127,961,190,000
开都河流域	828	473.97	48.98	23.2150	20,893,500,000
渭干河流域	853	1783.86	144.78	258.2731	232,445,790,000
阿克苏河流域	1005	2411.56	181.21	436.9870	393,288,300,000
总 计	8904	9194.97	109.91	1010.6333	909,569,970,000

参 考 文 献

- (1) 施雅凤、谢自楚：中国现代冰川的基本特征，地理学报，1964，30(3)。
- (2) 苏珍、王立伦、王志超、张文敬：托木尔峰地区冰川的新近研究，中国地理学会冰川冻土学术会议论文选集(冰川学)，科学出版社，1982。
- (3) Müller, F., Caflisch, T. and, Müller, G. Firn und Eis der Schweizer Alpen, Geographisches Institut, publ. Nr. 57, Zürich, 1976.
- (4) 王宗太等编：中国冰川目录，I，祁连山区，中国科学院兰州冰川冻土研究所出版，1981。
- (5) Grosval' D, M. G. and Kotlyakov, V. M., Present-day Glaciers in the USSR and some Data on their Mass Balance, Journal of Glaciology, Vol. 8, Feb. 1969, No. 52.