

260431

引水道式农村水电站 的冰凍問題

苏联 B. M. 波达波夫著

杜 一 民譯



2

483

水利电力出版社

目 录

序言	2
第一章 冰对农村水电站水工建筑物及水力机械 设备的影响	4
§ 1. 影响水电站运转的冰的种类	4
§ 2. 冰对水电站建筑物及设备的影响方式	7
§ 3. 水电站中现用的消除冰害的方法	11
§ 4. 捷連楚克水电站的冰害实例	13
第二章 河流冰冻的计算关系	35
§ 1. 河流冰情的若干特点	35
§ 2. 水流的热量平衡	37
§ 3. 流凌的数量特性	47
§ 4. 冰盖层形成时间的确定	60
第三章 水电站建筑物的设计及其在冬季的运转情况	63
§ 1. 对水电站首部枢纽的要求	63
§ 2. 对引水渠道的要求	71
§ 3. 从水电站压力前池排除冰凌的情况	87
§ 4. 冰凌在压力输水管中的流动情况	102
§ 5. 通过水轮机洩放冰凌	106
第四章 引水道式农村水电站在冬季条件下的 运转组织	114
§ 1. 水电站冬季运转的准备工作	114
§ 2. 在首部枢纽消除冰害的组织	117
§ 3. 在引水道消除冰害的组织	130
§ 4. 在电厂枢纽消除冰害的组织	140
参考文献目录	159

序 言

在苏联农村水电站的建設一年比一年越来越广泛地扩大着，电气化的集体农庄的数量正在不断地增多；同时，全盤电气化的州区数目也在不断地增長。

到 1953 年初，已有 20% 左右的集体农庄实施了电气化，同时，差不多全部的机械拖拉机站和国营农場也都电气化了。

在全部的农村發电站中，將近一半是水电站，由此可見，水电站在农業电气化方面是具有决定性意义的。而且，水电站容量的增長要比火电站的迅速得多。到 1953 年初，全部农村發电站的容量比 1940 年增加了四倍，而在同一时期里，水电站的容量却增加了九倍。

按照第十九次党代表大会的指示，今后农業用电除了利用大型水电站發出的电力以外，應該謀求进一步發展农村發电站的建設，而首先是發展合併后的集体农庄和各区中心地带电气化的水电站的建設。

大多数新建的水电站，其容量將从数百到数千仟瓦。同时，随着水电站容量的增加，就可以筹划把水电站联合成地方动力系统，并可改用自动調整。所有这一切使得有可能大大地提高农業生产中电力供应的可靠性，并且可以扩大农業生产中电力利用的范围。但是，随着电力在整个农業生产部門中的广泛运用，也就提高了对水电站运轉质量的要求，其中也包括对水工建筑物工作质量的要求。在这些条件下，水电站必須严格地按照計劃負荷圖来进行工作。同时，在一年中的各个时期里，由于水源的水文情况和气象条件的特点，水工建筑物在运轉中將会产生各种困难，因而可能在保証水电站的供水方面遭

到破坏。特别是在冬季，由于水源及水工建筑物中結成不同形式的冰，所以，这类的困难就可能經常發生。

为了順利地克服这些困难，無論是在水电站的設計期間，或是在運轉期間，都必須預先估計到这些困难出現的条件和形式。

引水道式水电站的冰凍狀況是特得复杂的。这些水电站多半位于苏联的山区里：在烏茲別克、哈薩克、塔吉克和吉尔吉斯等加盟共和国，以及北高加索和外高加索等地。

直到現在，对于农村水电站的防冰設備設計方法在有关文献中尚沒有十分系統的敘述。因此，本書的目的，就是試圖綜合地來討論农村水电站的冬季運轉情况，同时，介紹研究一些有关防冰設備的計算方法，并探討各种水工建筑物和設備冬季運轉的合理組織。鑒于有关冰熱計算問題的某种特点，所以把主要文献目录附入作为参考材料；有关敘述过程在一些刊物和文章中可以得到引証。

著者对技术科学博士 Д. Я. 索科洛夫、技术科学副博士 С. Я. 瓦尔达扎罗夫和 Я. Н. 弗列克謝尔諸位表示感謝，他們所提供的寶貴意見，在編写本書時都已考慮到了。

第一章 冰对农村水电站水工建筑物 及水力机械設備的影响

§ 1. 影响水电站运转的冰的种类

冰对水电站各种枢纽及各个构成部分的影响是多种多样的，并与冰(河流挟带的或水工建筑物范围内结成的)的种类、数量、气温和其他的气象条件、挟冰水流的水力状况以及各种水工建筑物的结构形式有关。

下述的各种冰(圖 1)，常常会造成种种的困难。

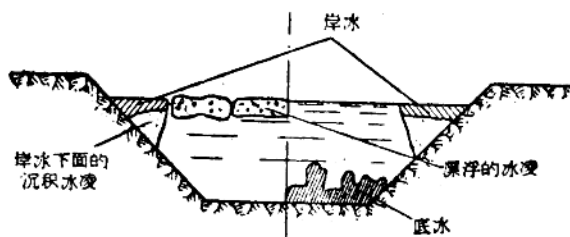


圖 1 冰結的种类

面冰 結于水面，这是由于在寒冷空气的影响下，因結晶作用或由于大量冰凌及冰上的积雪复盖層冻结而成的。冰的密度从 0.92(結晶冰)到 0.85(多孔的凌成冰或雪成冰)。水电站管理人員所見到的冰盖層厚度，在每年或每个冬季里，都是各不相同的。在水工建筑物附近观察所得的最大冰層厚度为 1 公尺，观测的冰層厚度增長的最大速度为 2 公分/晝夜。解冻天气时，冰盖層的融化速度超过其增長速度 4—6 倍。

掛結冰 是結在水工建筑物和閘門表面的結晶冰，由許多

薄層冻结而成；因此，这种冰的强度很高，同时它的温度 and 气温相近。由于冷气积蓄在冰層內的緣故，掛結冰的融化是徐緩的。

冰凌 是一种疏松的冰糝，視水流速度的不同，形成大小不等的零散顆粒，遍佈在水流深度处游动或成片地在水面上浮动。冰凌常以不同的形狀出現，片狀和針狀的冰凌乃是一种活动型冰凌，易于冻结在它所繞流过的物体表面；扁豆狀和球狀的冰凌，多出現在山区河流里，易于通过各种水工建筑物而不冻结在建筑物的表面。河流所挟帶的冰凌数量，在个别場合下，可能达到河流流量的10—15%。冰凌顆粒不冻结在一起时的凌糝密度为0.6—0.65。随着水流速度的增加，冰凌顆粒就逐漸地被帶入水流深处。不致發生散裂的片狀冰凌的最大流动速度是1.8—2.0公尺/秒（圖2）。

底冰 是分佈在河底上具有适合于冻结和聚集的水力条件的那些区域之內的水內冰。底冰有二种：一种是結晶底冰，是由于水內冰晶体增大使得水底結冰增多所致；另一种即所謂集結底冰，是冰的零散顆粒在水压力作用下碰到障碍物或相互碰撞到一起冻结而成。

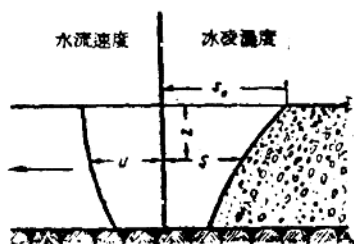


圖2 水流中的水內冰濃度示意圖

底冰沉陷的固結性，是由水流的过冷程度，冻结后的底冰所受的浮力与其和河底的粘結力之間的关系来确定。漂浮后的底冰如同冰凌一样游动于水流中。

雪凌 是水流挟帶的雪糝，由于降雪或暴風雪的刮送，雪即落到河中。雪凌具有不同的形狀，視河水的过冷程度和雪片

的温度而定。当水温为零度时，雪糢是疏松的，碰到途中的物体極易散开；当水和雪的温度低于零度时，雪糢就变得密实，并且具有較高的冻结性。河流中的雪量是各不相同的，并且視暴風雪活动相当猛烈的流域（或水电站的水道）的長度而定。

下述的冰冻作用，常影响到水电站的各种建筑物。

流冰 就是面冰于某一時間內 在河道或渠道中的稳定流动。对于平原河流，这种現象在春、秋兩季表現的特別显著。对于山区河流，河中流冰只是在解冻天气时才發生，这是一种短期的現象。

流凌 就是冰凌或雪凌于一定時間內在河道中的稳定流动（圖 3）。

一次流凌時間可达 5—6 晝夜而不停歇。根据高加索許多河流的觀測結果，流凌的平均時間为 14 小时。



圖 3 渠道中冰凌不断拥集的流动狀況

封冰 就是面冰在河道、渠道或水池表面上結成稳固的冰盖層。

冰坝或冰堆 就是大批冰块在河道或渠道某一区段上的混乱集积，因而使冰块及冰凌的流动发生障碍。

冰流是以多种多样的冰的结合形式流到水电站取水建筑物的。所以，受单一冰的影响仅是偶然的现象。通常流冰是和凌棚及雪棚的流动结合着；在流凌中可以看到混入的冰块；在流域中具有稳固雪盖层的地方，流凌则常和雪凌的流送结合着等等。

§ 2. 冰对水电站建筑物及设备的影响方式

1. 水工建筑物前冰块的聚集

河中流下的冰流大量阻截于水电站上游，以致它们不可能通过各种建筑物。在由于各种专门用途的建筑物（进水口、沉沙池及压力前池）所形成的，或者由于各种枢纽在结构上的特点所要求的水面局部扩展所形成的水域中冰堆，都可能发生沉积。

冰块聚集的产生是与流速较小的水面的冰盖层的生长有关，同时，也和从水电站上游河段或渠段流来的大批冰块有关。

冰盖层对建筑物的作用表现为一种力，当气温增高时，和建筑物相接触的冰便会膨胀，这时，建筑物（坝、闸门等）就感受到这种力。由于农村水电站的坝体并不大，冰压力这一因素就不起什么作用，所以，设计时通常都不予考虑。

在水电站上游形成的冰盖层的前端边缘，时常拦阻和聚集着大批由河流带来的冰块、冰凌和雪棚，并形成了大小不同的冰堆和冰坝。这种大量的冰的聚集现象，对建筑物是没有很大危险的，并且，当冰盖层具有足够厚度时，冰堆就可能是稳定的。

如果坝前水位涨落不定，这时，冰盖层就会变得不稳固，

崩裂开来，冰块移近建筑物，形成了大量的冰块聚集。冰块在水压力作用下逼近建筑物，升到水位以上，就从建筑物上边越过，造成了险恶的情况(圖 4)。

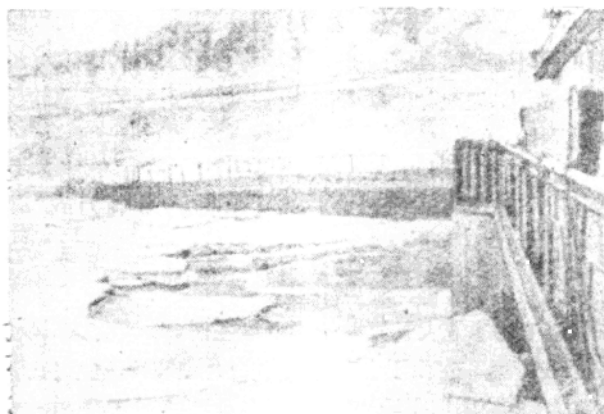


圖 4 坝前的冰块聚集情况

引水道式水电站的压力前池中常可見到大批聚集的冰块，从引水道流到电厂樞紐的全部冰块都会集蓄其中。这样，压力前池的运转与其他的建筑物比较起来，是处在最复杂的情况中。压力前池的功用就在于调节流入水輪机的水量，以及使冰凌由輸水管排除(当水电站采用这种方法时)和把多量的冰块排到水电站建筑物以外。而攔污栅被凌片和冰屑所复盖，压力前池全部为冰凌、雪棚和冰块所充塞，以及河水流入輸水管的受阻攔等，都是属于压力前池运转中最普遍的困难(圖 5)。

、冰块聚集在引水道建筑物范围内的主要危险，是由于引水道的容量不大，因而形成起来的冰堆便迅速地沿水流向上游方向扩展，以致冰块和冰凌充塞各渠道和隧洞的大部分水流断面；这样，在个别情况下，就使河水流向下游段受到阻碍。



圖 5 压力前池中的冰塊聚集情况

2. 水道中水流断面的充塞情况

視冰塊大小和水流速度的不同，流經水电站水道的水流，能够挾送某些数量的冰塊。当水力狀況改变时，即当流速減小时，或由于冰塊流动受到障碍，这样，就可能破坏冰塊的流动。

在明渠中，流动于水面的冰塊、冰凌和雪棚挤压着保护渠岸的渠壁。当水流全部表面充滿大量冰塊时，一部分小冰塊和冰凌就会冻结到渠道岸壁上，因而給冰塊的流动造成了附加的阻力。

随着水流中冰塊充塞程度的增加，冰塊和凌棚相互間發生阻制作用，因而促使水面上形成了冻结在一起的巨大冰塊。在某些水力和热力条件下，冰塊就会停滯不动。从水道上游流来的冰凌和冰塊便阻留在障碍物的附近，并且逐漸地形成冰堆。

当渠道流量突然降低时，冰堆可能結成另一种稍为不同的形状。在挾冰量相同的情况下，水流速度和深度的減小，会因

冰塊與渠壁和渠底所產生的擠壓，而造成冰塊攔滯的有利條件，這是因為流速值的顯著改變和流速場的重新分佈的緣故。

渠道断面內各種結構類型的障碍物，表現着類似冰堆的作用。這些障碍物是橋台和橋墩、洩凌道和洩雨道的支座以及其他的一些類似的建築物等。

渠道断面的縮減是從各種支座周圍的凍結以及从断面寬度和深度上的冰塊逐漸聚集開始的。

在閉合型断面的引水隧洞和輸水管中，由於漂起的冰凌碰擦到壁面，挾凌水流是在特殊條件下流動的。因而，這種水流容易引起許多意外的事故。沿隧洞或輸水管流動的冰塊，像在明渠中流動一樣，對於流速的變化極易感受，例如：當流速降低 20—25% 時，冰凌的穩定流動就可能破壞。這時，大批的冰凌漂浮起來，落到靠壁的流速降低的地方，它們同壁面發生強烈的碰擦，互相阻擠着；並且，當流速和挾冰量兩者之間有了一定程度的配合時，冰凌就會滯留起來，這時，便引起隧洞或輸水管中全部的冰塊都停止不動。

通過輸水管和水輪機洩放冰凌時，由於機組的負荷急劇降低，電廠樞紐就會發生意外情況；顯而易見，這種意外情況對水電站來說是極其嚴重的。

輸水管入口和機組本身乃是水電站運轉中的重要部分，這些地方也常發生冰害。在輸水管入口處可能聚集着大批冰塊；在機組的引水通道（渦殼及吸出管）中，當通過水輪機的流量不大以及水流中充滿着大量冰凌時，也可能聚集冰塊。

如果無壓引水隧洞里從水面到拱頂有足夠的空間，不致妨礙漂浮水面的冰塊的流動，那末，挾冰水流沿無壓隧洞的流動，就會像在明渠中流動一樣。

3. 建築物表面的冻结情况

閘門表面、攔河壩表面、渠壁、輸水管壁、攔污柵和水輪機導水機構等發生冻结乃是冰害的最普遍形式。要防止这种冰害是極其困难的，因为建築物表面必須进行保暖，但这并不是經常可以办到的。被冰層复盖的原因有下列几种：閘門上面溢水或波浪增漲，止水垫漏水，攔河壩受压而潮湿变化無常，滲層的水量从溢水道溢流以及急流槽中波浪激濺等。被河水冲刷的建築物表面，多半由于水流挟帶的冰塊和冰凌冻结于其上而發生結冰。桥墩、閘孔扶壁、攔污柵的柵条和導水機構的导叶通常就是这样發生冻结的。

如果輸水管中流速小，并且气温低时，輸水管中就会結冰。在个别情况下，輸水管中結成的冰壳厚度可达10—15公分。

4. 水輪機工作部分和冷却系統的冻结情况

当过冷的水流影响到水电站的水力机械設備时，常造成严重的冰害。水輪機導水機構的导叶和轉輪輪叶結冰，会引起水輪機壳体中为冰凌及冰塊所充塞。最普遍的冰害是水輪機的吸出管結冰以及水輪機排水池被冰塊充塞。技术給水系統的管道結冰会引起机組軸承过热，严重地破坏水电站的运转。

§ 3. 水电站中現用的消除冰害的方法

在許多文献中对各种防冰措施已有論述，因此，这里只作一簡要說明。防冰的主要任务就是將其排除到水工建築物範圍以外的地方。为此，已經創造了多种結構的洩凌設備，其中應用得最广泛的要算高斯頓斯基、瓦維洛夫洩凌道，这种洩凌道

已經在許多水电站中設置起来。但是，各种洩凌道的效率都很低(不超过8—10%)，这是它們的特点。

第二种防冰方法，中型及大型水电站在運轉經驗中曾視為确实可靠的方法，就是攔污欄的加热，这在一定程度上是削弱了冰的影响。但是，攔門加热的組織工作直到最近还没有安排妥当。对于小型水电站來說，这种方法曾被認為是不合算的，所以，加热法过去只在極少的場合下采用。

可是，这两种防冰方法仍然是不够完善的。

为了清除壅塞的冰塊、流送冰塊以及打碎冰塊，冬季運轉时就需要耗費大量的劳动。

排除冰凌又得耗用大量的河水，因为光是一次流凌所洩放的冰凌量就曾达几万立方公尺之多。

最近十年里，在水电站冬季運轉方面已經作出了重要的改进。水工建筑物運轉和防冰設施的新方法已經制定并得到应用。这就大大地減少了水电站運轉的意外事故。

下面所列举的水电站冬季運轉的一些主要方法，可以認為是最通行的方法，这些方法常根据不同的冰情互相配合应用。

在水电站上游集蓄冰塊 这种方法在中亞細亞和外高加索地区的水电站应用的最广泛。它的主要目的，就是在水电站上游河段和在壅水曲綫区内攔阻大部分的冰流。河中流来的冰塊常滯留于上游所結成的冰盖層的邊緣。目前已經制定了对冰堆、冰堆体积及其位置的控制方法，这是与維持上游水位狀況有关的。由于冰堆能把大部分的冰流攔住，因而水电站的運轉就十分便利。

由水道排除冰凌和冰塊 当水电站的上游延伸很長及冰流甚大时，排除冰塊就常常成为水电站正常運轉中的一項措施。对于引水道式水电站來說，由于冰塊难于經下游排除，因而从

上游排除冰塊就受到限制。所以，大体上是由引水建築物排除冰塊的。

水道防寒法 水道防寒法有下列二種：使水電站前方的河面結成整片連續的冰蓋層，以免水道中形成冰凌，並保證冰凌從冰層下面通過。第二種方法是把別處引來的熱水直接供送到攔污柵，以減少攔污柵結冰的危險，同時，使冰凌便於通過水輪機。

有些水電站為了消除河水的冷卻而設置渠道復蓋。

通過水輪機洩放冰凌 這種運轉方法最近非常流行，因為這時排除冰凌所耗用的水量最少。所謂通過水輪機洩放冰凌，就是在水電站建築物及設備的運轉中創造有利的動力及水力條件，以使冰凌能順着全部水道無阻礙地流動和通過水輪機。由於挾凌水流在流動中的各種特點，這種方法就受到一些限制，這在以後將單獨地予以討論。

最近幾年來，並未發現國外的水電站較之三十年代時期有任何重要的改進，他們那里也許認為加熱攔污柵以及在上游設置防冰牆以攔阻冰塊就是主要的防冰方法。

下面舉出一個典型的水電站的冰害實例，並介紹了各種冰害及其消除法的彙總表。

*

*

*

§ 4. 捷連楚克水電站的冰害實例

在蘇聯的不同地區里，位於有冰凌挾送河流上的各種引水道式水電站的冰害情況常具有許多共同點。這就有可能僅對其中一個水電站來詳細地研究冰害的性質。

這裡以大捷連楚克河的捷連楚克水電站為例，它是農村大型水電站之一，這個水電站具有各種代表性的水工建築物。

捷連楚克水电站位于大捷連楚克河(是庫班河左面的支流)的中游,距河口約 100 公里。大捷連楚克河是一条典型的山区河流,具有礫石河床,河底坡度达 0.01—0.02。河道流量变化自冬季枯水期的每秒数立方公尺到冰川融解期的每秒数百立方公尺。从 11 月下半月开始,水电站建筑物所在地的温度經常都是負的。温度的降低常延續到 12 月底或 1 月,此后天气就暖和起来。在冬季三个月期間,天气常冷到零下 30° 。对于平均年来說(圖 6),日平均的負气温总和变化自 12 月里的 40 度-日到 1 月里的 200 度-日。在个别年份里, $\Sigma(-t)$ 值降到零,而最大值則达到 300 度-日。根据气温变化的不同,冬季的湿度差变动自 0.3 到 1 公厘,在个别情况下达到 3—5 公厘。

雪盖層厚度常不超过 20 公分,只是在个别年份里才达到 40 公分。水电站地区的暴風雪是不猛烈的。随着冬季的到来,大捷連楚克河的流量在 1,2 月里常减少到 3—5 公尺³/秒。

冰凌和岸冰通常是在 12 月中旬出現,但在个别年份里也有在 11 月中旬或 12 月底出現的。流凌往往延續到 3 月中旬。流凌的猛烈程度及其頻度与日平均的負气温总和密切相关。冰凌的最大流量(达到河水流量的 30%)通常是在 1 月里,流凌达 25 天之多。

根据 7 年期間的观测資料,1949—1950 年的冬季是特別寒冷的,所以,在这一冬季观测到的冰情,就可以用它来作为捷連楚克水电站地区的計算依据。这个冬季与以往几个冬季的区别,就是 1 月里的气候非常寒冷,最低气温降低到 -31.7° ,每日平均的負气温总和則达 375 度-日。

在 1949—1950 年的冬季里,無論每日或一晝夜間,气温的变化極甚(圖 7)。例如:在 1 月里有四天的气温变化自 -31.7° 到 $+3^{\circ}$;而在 2 月里有三天的气温变化自 -25.4°

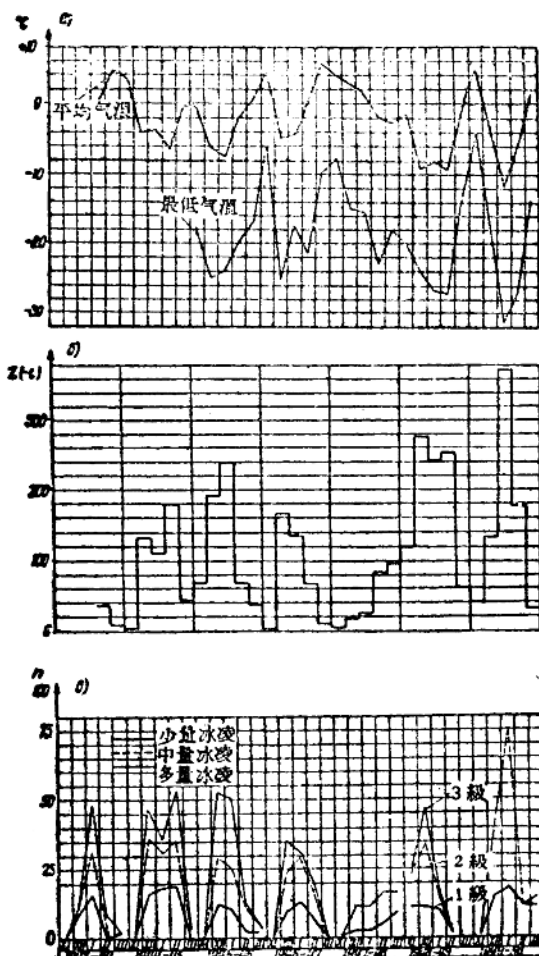


圖 6 大捷連楚克河在 1943—1950 年間气象条件和冻结条件的变化情况

●—一月平均气温及最低气温； Σ —日平均的气气温总和； n —流凌出现的次数； t —一月平均流量（公尺³/秒）。

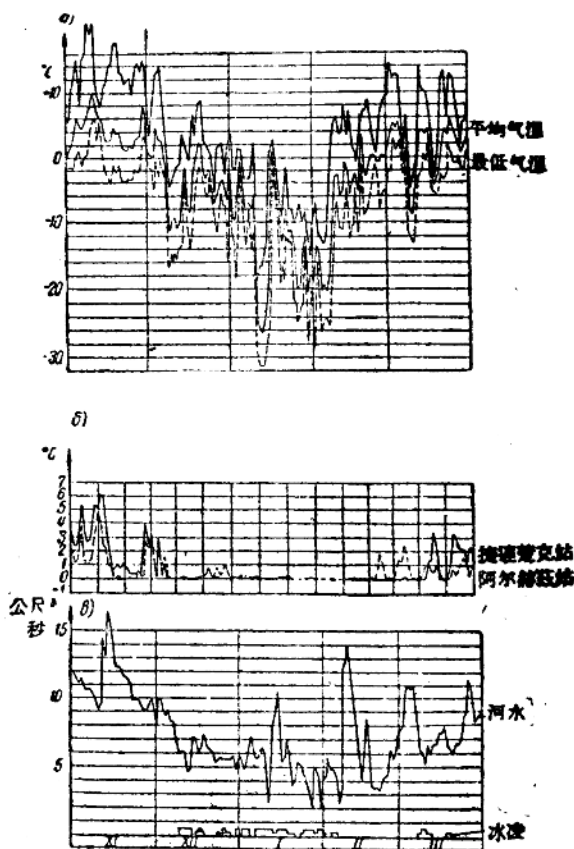


圖 7 大捷連楚克河在 1949—1950 年冬季里气象条件和冻结条件的变化情况

a—气温; b—水温; c—河水和冰凌流量。