

普通冰川学

C·B·卡列斯尼克 著

中国科学院地理研究所冰川冻土研究室

普通冰川学

C·B·卡列斯尼克著

丁 亚 梅 等 译

(内部资料 注意保存)

中国科学院地理研究所冰川冻土研究室

1965·兰州

С. В. КАЛЕСНИК

ОБЩАЯ ГЛЯЦИОЛОГИЯ

Допущено
Наркомпросом РСФСР
в качестве учебного пособия
для университетов
и педагогических институтов

ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
НАРКОМПРОСА РСФСР
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ★ 1939 ★ ЛЕНИНГРАД

本书系根据俄罗斯苏维埃联邦社会主义共和国教育部教育出版社1939年出版的С.В.卡列斯尼克所著“普通冰川学”(Общая Гляциология)译出。原书经苏联高等教育部审定为综合大学及师范学院教科书。

本书从理论上全面、系统地阐述了冰川的产生、发展和消亡，冰川的厚度和温度，冰川的运动和进退，冰川的地质地貌作用，冰川的分类和演变，冰川的地理分布以及冰期和冰期的成因等问题，并用了大量资料加以说明。

本书可供冰川学、地貌学、自然地理学、地质学、水文学、气候学等方面的科学工作者参考，也可供各综合大学和师范学院地理系作为开设普通冰川学课程的教科书。

譯 者 說 明

冰川学在我国还是一門很年輕的科学；而在国外却已有了几十年至一百多年的研究历史。为了使我国冰川学能在不长的时期內迅速赶上世界先进水平，我室决定組織翻譯力量将C.B.卡列斯尼克所著“普通冰川学”这一經典著作譯成中文以資借鏡。

在目前国外出版的有关冰川学的著作中，卡氏所著“普通冰川学”虽然出版較早(1939)，但仍然是比較全面、系統地闡述了普通冰川学的一般基础理論，且資料丰富，讲解深入浅出，較为切合我国当前冰川学的发展水平，通过对本书的学习，可为进一步研究和掌握世界冰川学的各种最新理論和探索我国冰川的各种規律奠定比較全面、系統的理论基础。

原书共分十四章。第一、二、四、七、八、十、十一、十三、十四等章以及第六、十二两章各一部分由丁亚梅同志翻譯（第十四章参考张耀光同志譯文）；第三、五、九等章以及第六、十二两章各一部分分別由郑本兴、任炳輝、王宗太、龙灵等同志翻譯，丁亚梅同志校对。全书譯校完后，由袁建模、赵长俊二同志审閱第一章，王宗太同志审閱第二、三两章，黄茂桓同志审閱第四、五两章，张长庆同志审閱第六章，袁建模同志审閱第七章，郑本兴同志审閱第八、九两章，董光荣同志审閱第十章，謝自楚同志审閱第十二章，任炳輝同志审閱第十一、十三、十四等章。全冊譯稿統由丁亚梅同志整理校訂，最后由施雅风先生审閱。

本书中譯本插图，系张恆、尹世玢二同志所繪。

翻譯冰川学經典著作，对我们來說，是属初次嘗試，就国内而言，亦是首次，几乎无資料可供参考。且譯稿是早在1962年以前分別由外文程度不一、专业水平不同的人員翻譯的，因而在总譯校过程中遇到不少問題和困难；我們虽然尽了最大努力，但由于時間仓促，經驗不足，水平所限，缺点和錯誤，仍在所不免，欢迎讀者批評指正。

1964.4.8.于兰州

作者原序

本书是由作者在国立列宁格勒大学讲授的普通冰川学教程修改而成。

本教程是逐步写成的。其中某些主要思想和论点已发表在一些杂志的论文和1935年出版的“冰川和冰川在地球生活中的作用和意义”这一本篇幅不大的书中。原准备在3—4年后完成一部详尽的普通冰川学专著，但因目前对普通冰川学教科书的需要极为迫切，不得不将材料仓卒付印，以应当前之需。

读者如愿将书中发现的问题、缺点和错误通知作者（地址：列宁格勒国立列宁格勒大学自然地理教研室），作者将不胜感激。

目 录

譯者說明

作者原序

第一章 水和冰的物理性質	(1)
1. 在标准大气压力下加热时水的状态的变化	(1)
2. 在标准大气压力下冷却时水的状态的变化	(2)
3. 在不同压力下水的状态的变化	(3)
4. 相图	(3)
5. 水的性质	(4)
6. 重水	(5)
7. 冰的变态	(5)
8. 大气中水汽的凝聚	(6)
9. 冰是一种矿物	(7)
10. 雪晶体的形成	(7)
11. 温度对雪晶体的形状和体积的影响	(8)
12. 冰是一种岩石	(10)
13. 再冻结作用	(13)
14. 冰的可塑性	(14)
第二章 雪綫	(18)
15. 永久积雪	(18)
16. 雪綫的种类	(18)
17. 影响雪綫高度的因素	(20)
18. 测定雪綫高度的方法	(22)
19. 地球上雪綫高度的分布	(32)
第三章 冰川产生和存在的条件	(34)
20. 何謂冰川?	(34)
21. 极地气候	(35)
22. 山地气候	(37)
23. 温度和降水的意义	(39)
24. 地形的意义	(39)
第四章 粒雪和冰川冰的結構	(41)

25. 冰川的物质补给源	(41)
26. 粒雪的结构	(43)
27. 粒雪盆的形态	(46)
28. 冰川冰	(47)
29. 粒雪綫	(48)
30. 冰川冰的粒状结构	(49)
31. 冰川晶粒的发育	(50)
32. 冰川的带状构造	(52)
33. 带状构造的产状	(53)
34. 关于带状构造的成因	(56)
第五章 冰川的物理特性	(61)
35. 测定冰川厚度的方法	(61)
36. 冰川厚度的一些资料	(64)
37. 冰川温度分布的理论概念	(65)
38. 冰川温度的实际资料	(67)
39. 冰川中的水	(69)
第六章 冰川的运动	(72)
40. 运动的速度	(72)
41. 测定运动速度的方法	(73)
42. 冰川速度的分布	(75)
43. 运动速度在时间上的变化	(78)
44. 冰川与河流之间的相似和差异	(81)
45. 冰川的动力学分类	(82)
46. 稳定冰川論	(82)
47. 冰裂隙	(85)
48. 冰川运动的原因	(86)
49. 冰川的汇合	(91)
第七章 冰川的物质消耗	(96)
50. 冰下消融和冰内消融	(96)
51. 冰面消融因素	(97)
52. 跪雪丘	(103)
53. 冰的日光风化	(104)
54. 分异消融	(105)
55. 消融的其它后果	(107)
56. 消融的测量方法	(109)
57. 冰川消耗的机械原因	(110)

第八章 冰川的进退	(113)
58. 冰川进退种类	(113)
59. 测定冰川进退的方法	(114)
60. 阿尔卑斯山脉冰川的进退	(116)
61. 冰島和斯堪的納維亞半島冰川的进退	(117)
62. 极地冰川的进退	(119)
63. 苏联冰川的进退	(120)
64. 其它一些地区的冰川进退	(120)
65. 冰川进退的幅度	(122)
66. 佛列尔規律	(122)
67. 关于冰川进退的原因	(124)
68. 气候的循环	(129)
69. 冰川进退的影响	(130)
第九章 冰川的搬运和堆积作用	(132)
70. 冰碛及其分类	(132)
71. 下碛和內碛	(132)
72. 表碛	(133)
73. 沉积冰碛	(135)
74. 冰川沉积特点	(136)
75. 冰川—河流和冰川—湖泊沉积	(137)
76. 冰面地形	(139)
第十章 冰川侵蚀作用	(141)
77. 冰蚀的有利条件	(141)
78. 冰蚀的一些影响	(142)
79. 河谷的改造	(144)
80. 冰蚀的力学理論	(145)
第十一章 冰川的分类和演变	(149)
81. 山頂和山坡冰川	(149)
82. 山谷冰川	(150)
83. 冰川系和冰川組合	(152)
84. 极地冰川的特点	(153)
85. 化石冰	(155)
86. 冰川分类尝试	(156)
87. 关于冰川演化的补充意見	(162)

第十二章 現代冰川的地理分布 (165)

88. 冰島和占美因群島	(165)
89. 斯瓦爾巴特群島	(167)
90. 法蘭士約瑟夫地群島	(168)
91. 新地島	(169)
92. 斯堪的納維亞半島	(170)
93. 比利牛斯半島和阿尔卑斯山	(172)
94. 北烏拉爾	(175)
95. 北地群島和新西伯利亞群島	(175)
96. 堪察加半島和朝鮮半島	(176)
97. 高加索和小亞細亞	(177)
98. 苏联中亞細亞	(179)
99. 阿尔泰和薩彥嶺	(182)
100. 喜馬拉雅山和喀喇崑崙山	(183)
101. 西藏高原	(184)
102. 新几內亞和新西蘭	(184)
103. 赤道非洲	(185)
104. 北美科迪勒拉山和墨西哥	(186)
105. 阿拉斯加	(187)
106. 拉布拉達半島和加拿大群島	(188)
107. 格陵蘭	(188)
108. 南美洲	(190)
109. 南极地帶	(192)
110. 現代冰川作用概況	(193)

第十三章 地球上的冰期 (195)

111. 古冰川作用的証据	(195)
112. 第四紀大冰期	(198)
113. 第三紀的冰川	(203)
114. 中生代冰川的遺跡	(204)
115. 石炭二疊紀大冰期	(204)
116. 前石炭紀冰期遺跡	(207)

第十四章 关于冰期的可能成因 (209)

117. 冰期最直接的成因	(209)
118. 宇宙說	(210)
119. 地球說	(211)

参考文献

第一章

水和冰的物理性质

冰川学是研究冰川的物理性质，研究冰川的产生、活动和演变条件以及研究冰川对地球表面的影响的一門科学。冰川是由于固态大气降水的积累和变化而形成的冰的自然堆积体，是地球上水的循环的特殊阶段和特殊形式，也是一种物质运动的特殊形式。这种物质，无论从科学观点或实用观点出发，都值得对它的全部进行专门的研究。在研究地球表面的各門学科中，几乎没有一門与冰川学无关。物理学和冰矿物学与冰川学均有密切关系，因此我們就从物理学和矿物学的问题谈起。

水是自然界中分布最广泛的一种矿物质。它对于地球上生物界的意义，不仅由它在地表的广泛分布所决定，而且还在于它有非常的活动性，并能在最平常的条件下形成固、液、气三种状态。

在本书中我們主要是想研究一下水的固相，但水的固相与其它两相，即液相和气相之間有不可分割的联系，因此还必需谈一谈水的一般性质，它与其它物体是大不相同的。

1. 在标准大气压力下加热时水的状态的变化 我們研究这些过程，首先从加热一块温度为 -10° 的冰开始。冰的比热，即使1克冰温度升高 1°C 所需的热量，为0.504卡。当冰块的温度在 $-10^{\circ}-0^{\circ}$ 之間时，若不断地对其加热，则冰块的温度上升，而且和其它物体一样，受热时体积增大。根据安德尔尤斯（Эндрыус）的资料，冰的体积膨胀系数平均值为0.0001633，而极端值则波动在0.0001064（低温条件）到0.0002203（温度在零度左右）之間^①。

冰在 0°C 时即开始融化^②。此时，虽继续加热，但在冰全部融化成水以前，它的温度是不会上升到高于 0° 的。因为这时热量消耗于使冰体内部的分子进行重新分布和破坏分子之間的联结，而这种联结正是区别固相与液相的条件。由于热量的支出不是表现在温度的升高，因而把它称为融化潜热。冰的融化潜热很大，约为80卡（精确数字是79.7卡），也就是说，1克冰融化需要的热量与1克水加热到 80° 所需要的热量相同^③。

比较一下冰原有的体积和融化成水后的体积，就足以证实冰融化成水后体积大约减小10%，因而冰较水轻，冰的密度等于0.9170。除冰以外，融化时体积缩小的只有铋、镓、镓、生铁和某些合金，而其它物体在液态时体积大都比在固态时大。

如果将水继续加热又会发生什么情况呢？众所周知，大多数物体在温度增高时体积膨

①安德尔尤斯是在 $-39^{\circ}.4$ 到 0° 的温度区間中进行测定的。

②熔点最接近冰的融化温度的物质是金属铋（ 28.5° ）和金属镓（ 30° ）。

③冰在负温条件下融化时（正如我們所見，加大压力即可达此目的）融化潜热较小，也就是说，温度較低的冰融化則較容易，例如 -7° 的冰，融化潜热只有76卡。

胀。水也符合这种规律，但在 0°C — $+4^{\circ}\text{C}$ 之间是例外。在此范围内，虽然温度增高，但水的体积却在减小，到 $+4^{\circ}$ 时水的密度最大，到 $+4^{\circ}$ 以上，水就符合物体的一般规律了。因而，在一般物体的温度与体积之间只有一种关系，而水体则能在两种不同的温度下保持同一种体积。水的这种与自然界很多过程反常的现象，其重要性是显而易见的。正是因为这个原因，湖泊和河流在冬季一般不会冻结到底，很少例外。

水的热容量（物理学上采用的单位）差不多比冰大一倍，因此对水加热比冰困难。只有很少一些物质才具有比水更大的热容量，如锂的热容量是1.04，氦气的是1.25，氢气的是3.4（在定压的条件下），液态氢的是6.4。

水在加热时不断地进行蒸发，加热到 100° 时就沸腾了，也就是说，这时蒸发不仅在表面进行，而且也在所有液体的内部进行。水沸腾时，浸入水中的温度表的指标暂不上升，这时加入的热量全部消耗于液体的汽化上。水的汽化潜热等于539卡。水全部变成蒸汽后，其体积比原来水的体积大1651倍，即从1公升 100° 的水加热就变成同温度的1651公升蒸汽。

2. 在标准大气压力下冷却时水的状态的变化 上节中我们所研究的过程如果向相反的方向进行，那么很明显，就会产生相反的现象。

水蒸汽变成水时，体积缩小，并放出汽化潜热（在这种场合称为凝结热更为合适）。 100° 的温度称为沸点。

水凝结成冰时，热容量减小，体积增大，并放出融化潜热。这时 0° 的温度称为冰点。

但是，这种相反的过程也可能进行得不很正常，如水的冻结便是一例。

冰是不能“过度加热”的，到零度时它就融化了。但水（一般液体）却可以过度冷却，它甚至在零度以下还可能保持液体状态。当然，过冷却状态的水是极不稳定的，那怕有一点最小的因素（其实质，至今尚未弄清楚），也足以使它立即全部变成冰。

液体（毛细管和器皿中的）越少，越容易使其过渡冷却。如果采取一些特殊的预防措施，就可以使液体冷却到相当程度。这时，液体越变越浓，粘度越来越大，直到全部变成固体状态，即变成非晶形玻璃状物体为止。塔曼（Тамман）抱着这种观点研究过150种以上的液体，其中有半数液体冷却到了玻璃状态。

如果水的过冷却只见于实验室中，那我们就不必加以研究了。但实际上在自然界中却常常可以见到水的过冷却。例如云、雾和雨滴中的水份，就可能甚至在很低的温度下还不致冻结。雨水的过冷却是常有的现象。尼维斯山（最高点为1343米，属苏格兰格兰扁山脉）观象台记载有 -7° 的小雨。别尔松（Берсон）用气球观测证明，有时尽管是 -20° 的温度，而构成云层的仍然是雨滴。关于过冷却的雾，也有十分可靠的资料。阿斯曼（Ассман）在哈次山布罗肯峰（高1142米）看见有 -10° 的液体滴。多布罗沃尔斯基（Добровольский）在南极地带 -15° 的温度下看见很平常的，由液体滴组成的雾。由于有这种雾甚至还能出现虹，不过仅仅是白色虹，而不是彩色虹。

魏格纳（Wegenar）在格陵兰 -34.5° 的空气中看见有液态水滴，倍尔德（Бэрд）考察队在南极地带（1928—1930年）达 -40° 的严寒下发现由微滴形成的雾（赫罗莫夫，1937）。

象水在零度以下仍能保持液体状态一样，水汽也能过冷却，或者说，液态水场上的水产生的水汽，一般说来能达到过饱和状态，过饱和的程度远远超过相对湿度的100%。

无论是水汽的过饱和过程和水的过冷却过程都证明，分子的结合（气体变为液体和液体变为固体）比分离（固体变成液体和液体变成气体）要困难一些。现在已经了解到凡是蒸汽

的冷凝和水的冻结都需要一种特殊的脉冲或刺激物，然而它们的作用的实质还完全没有弄清楚。一般认为，水冻结的脉冲是液体的震动，电火花、固体（器皿的四壁、小棒、针、线、小颗粒、尘埃等）的接触等。不过，这些因素在有些情况下有作用，在有些情况下又没有作用。唯一可靠的是水过冷却后，一旦与冰晶体接触，便立即引起冻结。但是，这也不能解决问题，因为在自然条件下，引起这第一个冰晶体出现的原因，仍然是一个谜。

没有刺激物时，水汽很难凝聚。这些刺激物便是吸湿性气体（流酸、过氧化氢、硝酸氨）的离子、分子和一氧化氮，尘埃等。

引起蒸汽冷凝最有效的刺激物，可能是所谓的吸水性核，因为它们是由对水具有化学亲和能的物质构成的。含有吸水性核的水形成的溶液，其表面的饱和蒸汽层比纯水要小一些（赫罗莫夫，1937）。

3. 在不同压力下水的状态的变化 上面我们所谈到的，只是水的状态在标准大气压力下的变化情况。如果不仅是温度，而且压力也发生了变化，那么，水的状态的变化就会出现一些特殊的规律。

大家知道，沸点又称为液体在一定大气压力下所能接受的最高温度。这种提法本身就很清楚地说明了存在于沸点和压力之间的关系。这种关系就是：液体承受的压力越大，其沸点就越高。例如，水在4.6毫米压力下的沸点是 0° ，在1个大气压力下的沸点是 100° ，在3个大气压力下的沸点是 132.8° ，在11个大气压力下的沸点已是 183° 。纳伦河上游（锡尔河源，海拔3600米），水在 87° 就沸腾，而在勃朗峰上（海拔4775米），水的沸点是 84° 等等。

熔点也是随着压力的变化而变化的。融化时体积增大的一切物质，其熔点都是随着压力的增大而升高；融化时体积缩小的物质，其熔点是随着压力的增大而降低。水就是属于第二类物质。每增加一个大气压力，冰的熔点就降低 0.0072° （根据别的资料是 0.0075° ），也就是说，当压力增到139大气压时，冰的熔点就降低 1° 。约在2200大气压力下冰能在 -22° 时融化。

冰的这种特性很清楚地表现在著名的波特托姆列依（Боттомлей）的实验中：将一块长方形冰块用两个支架托住，然后即可用一根金属丝穿过长方冰块而不破坏它的完整性。之所以出现这种现象，是由于金属丝下面的冰受到金属丝的压力而融化，而金属丝上面因该压力而融化的自由水又立即冻结，冻结时放出的热又通过金属丝传导到冰促使其融化所致。很显然，这个试验，只有在冰的温度接近 0° （因为挂在金属丝上面的重物的压力，实际上是不大的）和金属丝是热的良导体（如果用细绳就不能做出这种试验）这两个条件下才能作成功。

4. 相图 温度和压力之间的关系可以用图解的形式表示出来。用这种图形可以表示出水的各种形态存在的条件。

大家知道，有几种物质相接触时，能够用纯机械的方法分离出的每一种物质，叫做相。流冰期我国的江河中能同时出现水的三相，即冰、河中的水和空气中的水汽。夏季则只

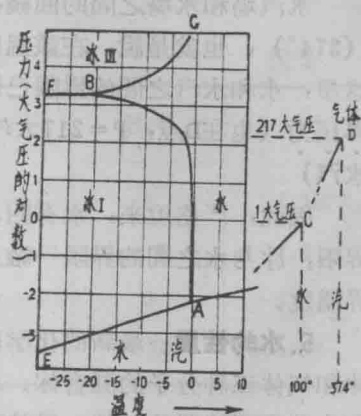


图1 水的相态图

图中符号：A—三相点（座标为 $P=4.57$ 毫米， $t=90.0075^{\circ}$ ）B—第二个三相点（座标： $P=2200$ 六气压， $t=-21.3^{\circ}$ ）。由于比例尺关系未容纳在图内的符号：C—水的沸点，（座标： $P=1$ 六气压， $t=+100^{\circ}$ ）D—临界温度和临界压力。

有两相。

图1是水的相图：横轴表示温度（由左向右升高）；纵轴表示压力（由下而上增大）。不过为了比例的方便，不是用大气压而是用大气压的对数来表示压力的大小。图上各线的意义是这样的：EA—冰和水汽之间的平衡曲线；ACD—液体水和水汽之间的平衡曲线；AB—冰和水之间的平衡曲线；FB—普通冰（I）与别种冰（III）之间的平衡曲线；BG—冰III与水之间的平衡曲线。由于水要在水汽的压力与周围环境的大气压力相等时才能沸腾，因而曲线ACD同时又表示不同温度条件下饱和水汽的压力，也表示水在不同压力下的沸点。

这些曲线将图面分为几个场。每一个场都是该相态稳定存在所需条件（温度与压力）的境界。各场之间的界线表示每两相态之间的平衡的条件，同时也表示从这一相态转变为另一相态的条件。两条曲线的交点，就是三个场和三相相结合的地方。因此，这些交点称为三相点，它们就好像是三相的起点（换言之，在三相点的座标所指的条件下，三相可能同时存在，而且处于平衡状态）。

从图上很容易看出物态变化可能发生的途径。例如，当温度（ t ）和压力（ p ）比三相点A（其座标是： $p=4.57$ 毫米； $t=+0.0075^\circ$ ）的数值大时，水汽即变成水；反之，当温度和压力比三相点A的要低时，水汽便会越过液相阶段而直接变成冰。这一点必须记住，因为大气中的冰（霜、雪）可直接由水汽形成。

在标准大气压力下冰在 0° 融化。如果压力增大，则正如图上所示，冰融化成水的曲线即从 0° 纵轴向左偏斜，也就是说，在更低的温度下即可融化。如果压力很大，温度很低（如三相点B，其座标是 $P=2200$ 大气压， $t=-21.3^\circ$ ），则冰不融化成水，而变为另一种类型的冰。

水汽场和水场之间的曲线，终止于D点，而且不再继续延伸。因为D点已经是临界温度（ 374° ），也就是说，在该温度以上，任何压力都不可能使水汽变为液体，即达到饱和。在这里，水和水汽之间的界限已经消逝。水汽在临界温度时能够使之达到饱和的压力，称为临界压力（也在D点， $P=217$ 大气压）。D点以上就不是水汽，而是气体（气体就是非饱和的水汽）

因此，严格说来，水有四种状态，即冰—水—水汽—气体。介于这四种状态之间有三个界限：冰与水之间的界限—融点；水与水汽之间的界限—沸点；水汽与气体之间的界限—临界温度。

5. 水的性质 最新的化学研究和光谱仪研究证明，包括水在内的各种液体都是固体、液体和气体三种分子的混合物。水的结构单位就是最简单的分子式 H_2O ，即所谓的水分子。水和水分子不能混为一谈，虽然它们的组成是一样的，但它们仍然是完全不同的两种物质，因为水分子是水的结构单位，而水则是这些结构单位与其比较复杂的分子结构单位的混合物。

水汽中所含的水分子，数量最多。当水汽变为液体状态时，水分子便联合成更大的复合分子。因而液体水中共含有不规则的分子（类似气体分子）、简单的分子缔合和复杂的分子缔合（类似固态中分子的排列），也就是说，含有适于不同聚集状态互相转换的各种类型的分子排列。这种混合物，全部处于动力平衡状态，阿尔姆斯特朗格（Армстронг）用 $(H_2O)_n \rightleftharpoons nH_2O$ 等式来表示。当温度和压力发生变化时，各种分子缔合类型中的某一种类型便开始占优势，我们就可以得到水的相应状态，即气态、固态或液态。

从化学观点看来，最简单的水分子究竟是什么，这一点还不十分清楚。因为 H_2O 这个化

学式可以作两种解释：或者水分子中的氢是该化合物的基本元素，则水应看成是氧化氢，即含氧的氢化合物；或者氧是水分子中的基本元素，则水应理解为氢化物，即含氢的氧化合物。第一种观点（水是氧化物）最为普遍，但近来弗里次曼（Э.фрицман, 1935），即论水的性质这本著名专著的作者，却坚决赞同水分子最可能是氢化物的观点了。

6. 重水 根据对水的性质的最新认识，水这种物质只是骤然看来才似乎是很简单的东西，而实际上却是很复杂的，它常常发生各种反常现象。对其它物体适用的一般物理规律，常不能应用于水。对于水的这种复杂性，冰川学者至少必须具有一般的认识，否则他的专业知识就不会有牢固的基础。

不久以前又为了解水的性质开阔了新的、巨大的可能性：1933年利威斯（Льюис）发现了不论物理性质或化学性质均与普通水大为不同的重水。

大家知道，有很多元素都是同位素混合物。所谓同位素就是原子量不同但化学性质完全一样的化学元素（因而它们在周期表内占同一个位置）。例如，汞、铜、锌、硅、锂等都属同位素混合物。其中，原子量为6.94的锂是由原子量分别为6和7的两种同位素组成的。普通的氧有 O^{16} 、 O^{17} 和 O^{18} 三种同位素，其原子量分别为16、17和18。普通的氢也有三种同位素，即 H^1 （氢）、 H^2 （氘）和 H^3 （氚），它们的原子量分别为1、2和3。这几种同位素在 H_2O 的分子式中以不同的方式结合时，可以构成18个不同的分子式。重水就是氧化重氢或氧化氘。有人认为，氘并不是氢的同位素。这样提是有根据的，因为氘的化学性质和重氢不同，因而美国化学家认为它是一种特殊元素，用符号D来表示。这样，重水的分子式就有两种不同的形式，或者是 H_2^2O （或 H^2H^2O ）或者简单写成 D_2O 。

试将表1中的一些数据作一比较，就可看出重水和普通水之间是有重要区别的。

表 1		
	H_2O	D_2O
密度	1	1.1075
最大密度时的温度 (C)	+ 4	+11.6
冰的熔点 (C)	0	+3.8
沸点 (C)	+100	+101.42

重水在自然界中分布很广，如深水池（贝加尔湖）的近底部分，果汁、牛奶和血液中都有重水成份，但其含量微不足道。

7. 冰的变态 第4节所分析的相态图中（图1），只有普通的三相点A（ $t=0.0075^\circ$ ， $p=4.57$ 毫米）对我们才具有实际意义。但第二个三相点B在理论上却很有价值，因为它提出了冰的变态问题，即冰的多态性问题。这里我们只是顺便提一提。

对冰的多态性进行过研究的，主要有塔姆曼（Тамман）和布里支門（Бриджмэн）两人。他们在很低的温度和很大的压力下（仅仅是用实验室的方法）获得了几种具有很多奇特性质的变态冰。虽然普通冰（I号冰）是比水轻，但其它几种冰却比水重，因而在水中必定会下沉。根据布里支門的资料，I号冰比水轻10—13%，II号冰比I号冰重22%，III、V和VI号

冰分別比水重 5 %、6 %和9.5 %。正如我們所看見的那樣，Ⅱ 号冰不仅在普通水中，而且在重水中也會下沉。塔姆曼所發現的Ⅳ 号冰，布里支門沒有找到。根據尼科爾斯(Никольс)、文琴特(Винцент)和列麥克(Ледюк)等人的研究，含有空氣的冰，密度和Ⅳ 号冰一樣(即 1、12)。

圖 2 是各種冰的融化曲線和它們之間的平衡曲線圖。普通 (I) 冰 (0—I) 的融化曲線是隨壓力的增大而下降，而其它種類冰的融化曲線却是隨壓力的增大而上升 (0—3、0—5、0—6)，這一點是很引人注意的。根據布里支門的研究，Ⅶ 号冰在 20670 大氣壓力下要到 76.35° 才融化。圖上沒有Ⅱ 号冰的融化曲線，因為Ⅱ 号冰本身不能直接融化為水，而必須預先經過Ⅲ 号冰的階段。

表 2 所示，是水和各種變態冰的三相點的座標。

8. 大氣中水汽的凝聚 冰或者是直接由水汽形成 (不經過液態階段)，或者是由水凍結而成。下面我們主要研究的，是由水汽直接形成的冰。

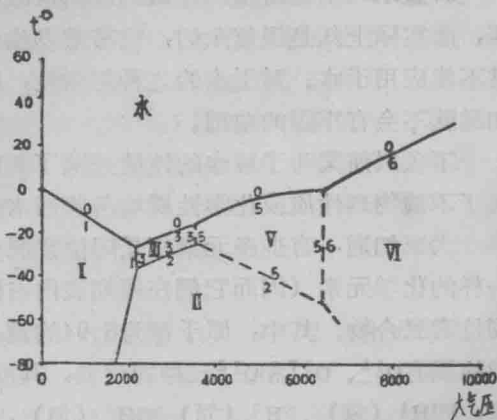


圖 2 各種水之間的平衡曲線 (根據布里支門的資料)。

水和各種變態冰的三相點的座標 表 2

相	座標	溫度 (C°)	壓力 (仟克/厘米 ²)
水——Ⅰ 号冰——Ⅲ 号冰		-22	2115
Ⅲ 号冰——Ⅲ 号冰——Ⅰ 号冰		-34.7	2170
Ⅴ 号冰——Ⅲ 号冰——水		-17	3530
Ⅴ 号冰——Ⅰ 号冰——Ⅲ 号冰		-24.3	3510
Ⅶ 号冰——Ⅴ 号冰——水		+0.16	6380

含有水汽的空氣，根據相對濕度的指標，可以比作一種未飽和的、飽和的或過飽和的溶液。溶液過飽和時，通常就要被破壞，並出現新的相。水汽過飽和時，便出現凝結 (水汽變為水) 和結晶這兩種不同的現象。凝結和結晶產生的一般條件，見相圖 (第 4 節)。現在我們談一談冰川學者所需要了解的一些細節問題。

過飽和可能是飽和空氣的溫度降低或壓力增大這兩種作用的結果。自然界中水汽的過飽和常常是由於氣溫降低所致，而且這種氣溫的降低是受動力的影響和絕熱的緣故。空氣常能上升到壓力較小的區域，空氣達到該區域後，由於壓力減小，故體積增大。體積增大時，溫度降低，結果導致水汽由飽和、過飽和直到最後凝聚成水。如果空氣繼續上升，則再經過這樣的階段而使水汽更多地凝結為水。空氣上升得越高，由於水汽上升過程中多次凝結的結果而使空氣變得越乾燥。很明顯，當空氣上升到很高的高度，即上升到結晶的有利條件地區 (即低溫低壓區) 時，空氣中剩下的水汽就不多了。我們試將降落到地面上的固態大氣降水

和液态大气降水比較一下，就会觉得前者是很少很少。如果說，雪仍然有着很显著的作用，那是因为雪能积聚起来，而雨都不能积聚起来的緣故。

可見，引起冷凝和結晶的主要因素是空气的上升运动。人們通常把“被迫上升”区别开来，因为它主要是由于一些地方因素引起的（譬如当存在气流必須翻越的山岭式屏障时）。規模更大的是“自由上升”，它主要是由于赤道区的地表溫度很高，因而造成空气的上升运动所致。最后，在中緯地区，气旋族中的上升运动起着巨大的作用，因为被最低气压吸入的空气层，总是向旋渦中心流动，然后上升到很高的大气层再向四周扩散。旋渦的作用在于将广闊空間內的水汽和空气集中到一点（旋渦中心），然后再将它射向上空，使其凝聚。因此，气旋实际上是一个制造包括大气冰在內的降水的活动工厂。

9. 冰是一种矿物 就結晶学特性而言，冰应属六角形晶系。它具有四个結晶軸，其中，有三个在一个平面上，互相形成 60° 的角度；另一个（主軸）則与該平面相垂直。晶系的典型代表是六面稜体。主軸与其它軸比較起来，如果延伸得很长，則雪的晶体形成管状或針状。反之，如果主軸很短，則形成六角形薄片。六角形中的各个角是相等的（ 120° ），但各边的长短則可能不一样。薄片的复杂化是由于其枝叉（普通小星形）增多所致。因为每一个枝叉本身又可能进行分枝，而每一个分枝有时又继续分枝。这样就构成了各式各样的，极为优美的透花图形。丁鐸耳（Тиндаль）說，他在罗扎峯看到的和落到毡帽上的雪，“全是由小冰花組成的，每一朵小冰花都有六片花瓣，有些花瓣象山苏花一样放出小側舌，有些是圓形，有些又是箭形和鋸齿形，有些是完整的，有些又呈格状，但都沒有越出六瓣型的范围。”

雪片放大照片蒐集最多的（如美国人宾特列依）达5300张，其中找不到两张完全一样的①。

冰的独特的对称性还表现在所謂的“丁鐸耳象”（融化图形）中，如果預先用双凸透鏡集中太阳光綫，然后使之穿过透明的冰，便可看出冰块内部光綫通过的途径上形成了一些不大的光亮点，每一个光亮点的周圍都有一个象六瓣型花一样的图形，这些花瓣是由内部融化时产生的水組成的。根据这些花瓣是完全对称这一点，可以得出結論：冰是单軸的晶体，它的光軸与形成花的平面相垂直。冰的光軸，即光綫不发生双折射时通过的方向，与主軸一致。

冰沒有解理，硬度为1.5。純冰的顏色在大冰体中是兰色的，有时是綠宝石色或紫色的。色彩的深浅与冰內所含的杂质和气泡的多少存在相反的关系。如果杂质和气泡很多，則冰呈白色。

薄片形、柱形、針形等是雪晶体的基本形状，但最普遍的（因而也是最标准的），是薄片形，而薄片本身又具有各式各样的形状。

10. 雪晶体的形成 根据列曼（Леман）所闡明的各种晶体发育的一般情况，片状雪晶体的发育，主要有两种情况。一种情况是在标准的介质中，即在溶液微过饱和的条件下，晶体发育得緩慢、均匀，因而形成“完整”形状。一种情况是介质处在强过饱和状态，晶体发

①收集有雪片放大照片的，还有諾登謝尔德（Норденшельд），加尔別尔格（Гальберг）和錫格松（Сигсон）等人。諾登謝尔德約保存在斯德哥尔摩气象学院，加尔別尔格的保存在烏普薩拉（Упсала）天文台，錫格松的則保存在列宁格勒总观察台。