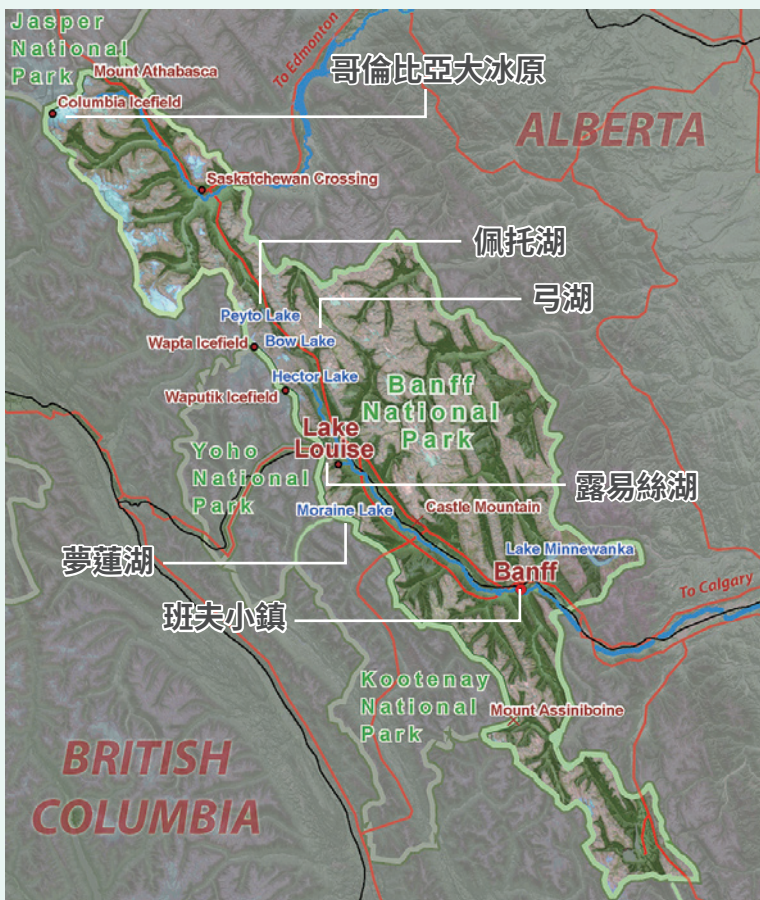


冰與岩石的詠嘆調 ——加拿大班夫國家公園 的冰川湖泊

An Aria of Ice and Rock
- Glacial Lakes in Banff National Park

陳聖元 | 經濟部中央地質調查所

Chen, Sheng-Yuan | Central Geological Survey, MOEA



班夫國家公園位在北美洲西北方高緯度、高海拔的落磯山脈上，經年累月持續的降雪層疊壓密成厚重的冰塊體，重重地壓在山上，緩慢沿著岩石表面摩擦、移動與磨蝕，山脈受到冰川侵蝕，形成壯闊且線條優美的U形谷。

冰川的流動難以覺察，必須以很長的時間尺度來想像，才能將岩石破碎刮削的聲音化為無聲；而這樣的代價，竟是以春夏融冰凝聚的清激水流，在冰川末端積成藍得不可思議的冰川湖泊，作為回報。

班夫國家公園冰川湖泊位置圖 (圖片修改自: User:AudeVivere, CC BY-SA 2.5, via <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Banffmapv2.jpg>)



雲霧籠罩的哥倫比亞大冰原，是北美洲水文最高點，冰川的融水向西可流入太平洋，向東流入大西洋，向北則流入北冰洋

落磯山脈 (Rocky Mountains) 是太平洋板塊隱沒到北美洲大陸板塊以下，造山運動抬升所造成東北西南走向綿延的山脈；該山脈北起加拿大西北英屬哥倫比亞省 (British Columbia) 及亞伯達省 (Alberta)，向南綿延至美國西南部新墨西哥州。班夫國家公園 (Banff National Park) 即位於加拿大西部亞伯達省的落磯山脈上，鄰近地區出露的岩層大多為淺海相沉積的沉積岩，包括頁岩、砂岩、石灰岩

等，岩層的地質年代約介於前寒武紀與侏羅紀之間。

班夫國家公園成立於 1885 年，是加拿大第一座國家公園，北美的第二座，僅次於黃石國家公園，並在 1984 年被國際教科文組織 (UNESCO) 登錄為世界遺產。公園境內遍布許多著名的冰川，如以北美洲大陸水文最高點而著稱的哥倫比亞大冰原，以及弓湖冰原、佩托冰原、烏爪冰川、赫克托冰川等。

冰川的形成及冰川作用

全世界陸地上的淡水，約有 68.69% 儲存於南北兩極的冰原及陸地冰川，並零星散布於高海拔的高山上，以固態冰的方式存在，可說是陸上最大的淡水儲存庫，在地球的水循環中扮演了極重要的角

色。當全球氣溫變化，讓冰原與冰川的體積增加或消融的同時（地質上區分為冰期、間冰期），也會讓海洋水面下降或上升，影響陸地出露於海水面之上的面積。由於海水平面是地表侵蝕的基準面，

許多地質作用皆受控於海水面變遷，同時也會對物種的演化及滅絕、陸域環境及生態等地球系統造成影響。

當大氣圈中的水氣於高空中達到飽和，凝結成水或冰晶降下，倘若地表溫度條件夠低，能以冰的型式降下，就是俗稱的降雪。下雪的情況在高緯度地區及高山相當常見，由於冰雪是固態，會在原地積聚，不像液態的水會立即由高處往低處流動而逸散；累積的降雪在壓密過程會逐漸將空氣排出，形成龐大的冰塊體，受重力拖曳且克服與岩石間摩擦力後逐漸往下移動，同時山頂每年冬季有新的降雪持續補注，因而形成一個完整的冰川系統。

冰川的移動主要受兩個作用影響，即底部滑動作用 (basal sliding) 和內部冰晶間潛移作用 (internal deformation)。前者常見於環境溫度高於或在冰點

上下波動的地區，如溫帶的高山冰川，融化的冰水在冰川與岩石的接觸面間形成一層水膜，可降低底部摩擦力，有利於冰川受重力往下移動；內部潛移作用指的是冰晶內部受重力及壓力，沿著一系列平行的內部結晶面移動，造成冰塊體的變形而移動，為終年寒冷結凍地區的主要移動方式，例如南極冰原。

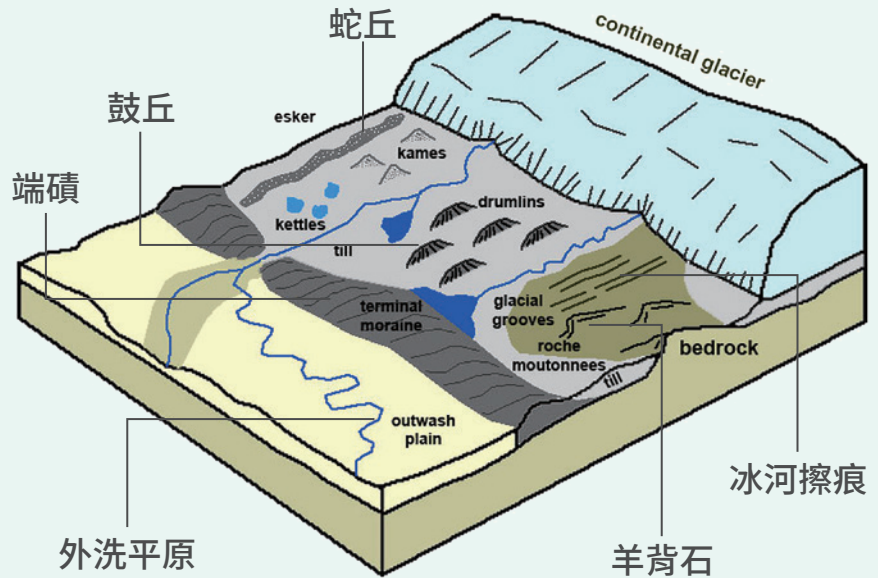
冰川和河川特性十分不同，冰川由龐大冰塊固體組成，因此和接觸的岩石之間存在很大的摩擦力，無法自由地移動。然而受重力的驅使，或是融冰的水降低摩擦力，使冰川緩慢移動。也因為這個摩擦力，讓冰川能夠磨蝕形塑所經的地形，形成許多獨特的冰蝕景觀或現象，譬如冰河擦痕；平行擦痕的方向，同時也指示了冰川的流動方向。另外冰河谷呈現優美的U字形，和河谷下蝕明顯的V形谷很不一樣。

冰川湖泊的形成

被冰川磨蝕攜帶的岩石，隨著冰川的移動帶到下游山麓地帶堆積下來，這些沉積物也會形成特殊的地形，比如蛇丘 (esker)、鼓丘 (drumlin)、側磧 (lateral moraine)、端磧 (terminal moraine)、外洗扇 (outwash fan) 等，其中端磧的成因，即為冰川挾帶的岩石隨著冰川前進，最後隨著冰川融化，於冰川末端留下的沉積物。冰川融水常會聚集在侵蝕形成的U形谷，並受到端磧阻攔而匯聚，在尾端之後形成一個冰川湖泊。

冰川沉積物特色是淘選度差。每年夏天融冰除了留下所攜帶的沉積物外，冰川融水中也含有許多細顆粒岩石粉末 (rock flour)，這些粉末因為顆粒太細而呈現雲霧狀地均勻懸浮在水體當中，當水中的岩石粉末漫射光線，與湖水深邃的藍混染，便呈現冰川湖泊土耳其石般亮眼，或隨著水深、陽光角度及天候不同，映照出令人醉心的寶藍色或帶綠色調的祖母綠色。班夫國家公園便擁有許多美麗迷人的冰川湖泊，在冰川侵蝕造成的U形谷內，高聳筆直的針葉林之中，宛如散落在落磯山脈的藍、綠寶石。

冰河侵蝕堆積地形示意圖。蛇丘為冰川底下融水流動所搬運較細粒的沉積物所形成，呈現長條狀，略平行於冰川移動方向；鼓丘與羊背石為冰川底部的地形突起物遭受冰川侵蝕及堆積作用而形成的地形(圖片修改自：MiraCosta Community College open-source textbook. https://gotbooks.miracosta.edu/earth_science/chapter13.html)



班夫國家公園的冰川湖泊

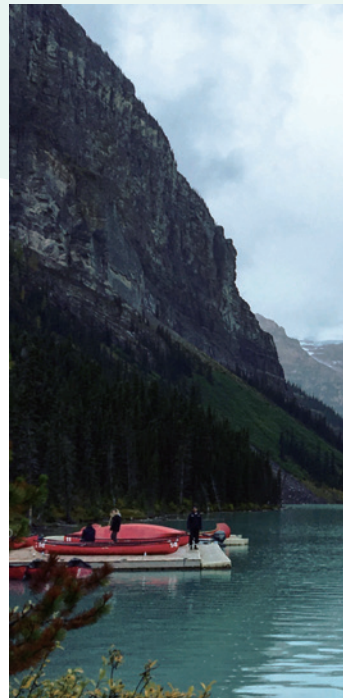
佩托湖 (Peyto Lake)

佩托湖的湖水源自佩托冰川融化的水，夏季融化的冰川水含有大量冰川塊體磨蝕底部岩石所造成的岩石粉末，使佩托湖的顏色在夏季呈現寶石般迷

人的藍色，是尋訪班夫國家公園時，不可錯過的景點之一。



佩托湖呈現狹長型，從半山腰上的觀景臺即可俯瞰全景。佩托湖鄰近93號公路(Icefield Parkway)，交通方便，是來班夫國家公園必訪的名勝



弓湖 (Bow Lake)

弓湖為一典型的冰川湖，海拔約 1,920 公尺，匯集了弓冰川 (Bow Glacier) 及鄰近鴉爪冰川、瓦普達冰川的融水，是弓河的源頭之一。從弓湖湖岸北端往南眺望，可以看到弓湖廣闊的水面倒映優美的山脈 (Crowfoot Mountain)，景色十分壯麗。從

不同角度看弓湖的湖水，顯現出不同色調的藍。附近有許多有名的步道，往弓湖西南方步行數公里，即可達弓冰河瀑布 (Bow Glacier Fall)，瀑布從岩石上傾瀉下來，水量豐沛，是班夫國家公園非常熱門的景點。

露易絲湖 (Lake Louise)

海拔高度約 1,731 公尺，湖水最深處約 85 公尺，最初在 1882 年由一名導遊湯姆威爾森 (Tom Wilsom) 發現並因藍綠色的湖水而命名為 Emerald Lake。有趣的是，因為冰川湖泊常呈現相似的藍綠色澤，使得當時許多不同的冰川湖泊都被稱為 Emerald Lake。

而該湖泊於 1914 年以維多利亞女皇的第 4 個女兒，同時也是當時英國任命的加拿大總督的妻子

露易絲公主的名字重新命名。露易絲湖的湖水由維多利亞山上的維多利亞冰川融化的水積聚，並受到冰川端積堆積物阻塞而形成的冰碛湖；露易絲湖的美如綠寶石的湖水，最終流入弓河。

著名的費爾蒙露易絲湖城堡飯店 (The Fairmont Chateau Lake Louise) 坐落在湖的東岸，為加拿大太平洋鐵路集團擁有，是一棟已經超過 100 年的歷史建築。



1

2

3

- 圖1 弓湖平靜的湖水，水面倒映天光及遠方山脈的影子；隨著湖水由淺到深，呈現不同層次的顏色。沿著湖畔步道散步，彷彿心靈也獲得寧靜的力量
- 圖2 班夫國家公園最負盛名的露易絲湖，湖水幽藍帶有神秘的綠色調。在群山環繞，碧波相連的露易絲湖面搖槳徐行，是再愜意不過的事了
- 圖3 夢蓮湖畔有數堆冰磧石堆積成的小丘，沿著步道走到小丘頂端，即可俯瞰整個湖面；許多美麗的夢蓮湖風景明信片，就是由這個角度所拍攝

夢蓮湖 (Moraine Lake)

夢蓮湖的中文名稱，是由Moraine Lake直接音譯而得，而Moraine一詞，即是冰磧石的意思，是一種受冰川磨蝕搬運而堆積的產物，特徵為淘選度極差，大小不一並且形狀多角。夢蓮湖不是典型的冰磧湖，而是冰川融水受到從山崖上的落石於山腳下堆積的落石錐 (talus cone) 阻塞而積成的湖泊。

湖水的來源同樣為冰川融水，但是夢蓮湖的湖水呈現一種不可思議的藍，彷彿湖水被摻進大量天藍色的顏料，呈現土耳其石般美麗的藍色。冰川搬運來的冰磧石在湖旁積成一座小丘，湖畔亦堆滿許多被冰川運來的巨木，別有一番景緻。夢蓮湖可是許多班夫國家公園健行愛好者心中排名第一的湖泊。

溫室效應的縮影

全球暖化效應，不只使夏季的冰川加速融化，同時也減少冬季的降雪量，導致全球的冰川持續後退。夏季融化的冰川水量增加，使得美麗的冰川湖泊面積變大，數量也變多；然而清澈靈動的碧藍色湖水背後，卻是地球在氣候變遷及全球暖化之下，給我們發出的警訊。

根據科學家研究，整個 20 世紀期間，加拿大落磯山脈的冰河消融了超過 25%，而 21 世紀後，2009 至 2018 年北美冰川體積消失速度，是 2000 至 2009 年的 4 倍。或許在我們有生之年，陸地冰川將會消失殆盡，這些美麗的冰川湖泊也將化為泡影，後代子孫只能倚藉照片中的美景，憑弔動人的寶藍色湖水映照著藍天與山巒疊翠。

臺灣的冰河地形

臺灣冰河地形的研究，始自 1932 年日治時期的學者鹿野忠雄；但其後也有一些學者提出，這些所謂的冰河地形，不過是河川向源侵蝕造成的崩谷等看法。為了澄清雪山冰河地形相關爭議，國立臺灣大學、國立成功大學及雪霸國家公園管理處於 1998 年延請北京大學冰河學者來臺勘查，發現了許多冰蝕地形地貌證據，確立了雪山主峰周圍圈谷為冰河地形。古氣候學家推算古雪線的高度，分別推得於 7 萬至 5 萬 5 千年前，臺灣高山的雪線可低至 3,400 公尺以下；1 萬 8 千年前的古雪線，也約略在 3,500 公尺左右，證實了臺灣的高山在前幾次冰期的確具備了堆積冰雪蘊育冰川的氣候條件。

目前臺灣高山中，證實為冰河地形的有雪山圈谷、南湖圈谷；而素有天使眼淚之稱的嘉明湖，經研究推論應為冰川侵蝕造成的凹地，聚積雨水及融化雪水而形成的冰斗湖。



臺灣的雪山圈谷為受冰川侵蝕形成的地形，呈現寬闊優美的 U 形山谷

結語

在過去地球的歷史，全球溫度變化，冰期與間冰期相互交錯，影響了冰川的體積、分布，以及海面的高低，造成侵蝕基準的變化、滄海桑田，可謂對地表地質的影響息息相關，環環相扣，甚至位於副熱帶地區的臺灣高山上也有冰蝕地形的遺跡，其影響範圍可見一斑。在地球歷史中經歷過許多次冰期，而學者透過研究冰河遺跡的分布，也發現歐洲大陸及英國曾經廣為冰川覆蓋；經由這些研究可得知，冰川侵蝕的作用、冰蝕地形以及其堆積物，影響現今的地表地貌的程度，或許遠超乎我們原本的想像。

上個冰期約在 1 萬 2 千年前結束，目前全球處於逐漸暖化的間冰期；而人類對全球氣候變遷的影響，溫室效應氣體的排放，引發一連串連鎖反應，

使得全球暖化速度加速了好幾倍，若無法有效控制，全球高山上的冰川可能會在我們有生之年消失殆盡。少了冰川融雪的補注，這些有如寶石般亮麗的冰川湖泊也會枯竭而成為歷史，除了影響地理景觀，更會造成許多仰賴冰川生活的物種滅絕。此外，世界上多數重要河流的源頭，都是高山上的冰川融水；一旦冰川消失了，將會對流域下游的生態系造成極大衝擊。

本文希望能藉由介紹這些美麗的冰川湖泊，喚起讀者們對環境的重視與全球暖化的省思。地球系統隨時都在緩慢地變動，而人類活動造成的汙染，已大幅加速氣候變遷、海平面上升及物種滅絕等變化，最終仍會影響到人類的生存；因此，我們更應該珍惜所擁有，並將這些美好，傳遞給下一個世代。

參考文獻

- 楊建夫、崔之久、王鑫、宋國城(1999)。台灣高山冰河地形爭議的新發現。地質，19(2)，16-20。
- 楊建夫、曹常鴻、林大裕、黃一元(2015)。哭泣的「天使眼淚」——世界級地景嘉明湖的快速消失。載於 2015 全國登山研討會論文集(頁 177-192)。
- Menounos B., Hugonnet R., Shean D., Gardner A., Howat I., Berthier E., Pelto B., Tennant C., Shea J., Myoung-Jong Noh, Brun F., Dehecq A. (2019). Heterogeneous changes in western North American glaciers linked to decadal variability in zonal wind strength. *Geophysical Research Letters*, 46(1), 200-209.
- The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. (2021). Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp.1211–1362). doi:10.1017/9781009157896.011.
- Bailey, R. H. (1982). *Glacier* (Planet Earth Series, vol. 5). Time-Life Books.