

打造天生贏家

——DNA和演化的強力證據

Sean B. Carroll 著

楊佳蓉 譯

鄉字文化

導讀與推薦

首先，我必須誠實地說，當我在1997年第一次聽到本書作者西恩·凱洛 (Sean Carroll) 的大名時，心中是有些疑惑，甚至是不服氣的。因為，我的前指導教授麥克·艾肯 (Michael Akam)，以及喜愛演化發育學 (Evolutionary Developmental Biology; 常被簡稱為「Evo-Devo」) 的同事，對他在蝴蝶翅膀斑點的研究，簡直是推崇備至而且到了著迷的地步。當時才剛剛進入博士班的我心中想著：研究蝴蝶翅膀上的斑點有什麼了不起的？要不是史恩·凱洛和我所喜愛的前O O七巨星史恩·康納利 (Sean Connery) 有著相同的大名，甚至連姓唸起來都有點像，我可能對他不會有印象。然而，隨著對發育生物學文獻之涉獵逐漸加增，很快我就察覺到自己的幼稚，同時也發現史恩·凱洛是位「超人氣」的科學家。

初次接觸凱洛作品的讀者，可能會覺得他是一位專職的科普書籍作家：因為他的文采豐富，不像一般科學家慣於制式的論文寫作；再者，他總是旁徵博引，尋得許多跨領域的證據來闡述其論點。這其實是一般整天待在學術單位的科學家所無法想像的事（至少我目前完全辦不到），因為光是撰寫研究計畫和期刊論文就覺得時間不夠用了，怎麼還有閒情逸致去從事科普書籍寫作？然而事實是：凱洛辦到了，而且看來好像還游刃有餘。舉例來說，他是國際知名的細胞與發育生物學家，研究論文常見諸頂級之學術期刊；他的研究室長年受美國霍華休斯醫學研究所 (Howard Hughes Medical Institute) 支助。這在美國，是研究卓越的表徵。同時，他在2007年當選為美國國家科學院院士。除了這本2006年出版的科普作品，2001年至2009年期間他還寫了另外三本科普書

籍，外加兩本專業教科書。去年八月下旬，分子細胞學頂級期刊「細胞 (Cell)」雜誌的封面特別以醒目的獅子、麋鹿、果蠅等圖案，介紹凱洛的研究室對调控果蠅雌雄性狀分子網路的貢獻，因為這項研究成果對動物性狀決定有著重要的啓發。由此可見，凱洛仍處研究顛峰。關於凱洛其它的英勇事蹟，請讀者自行「Google」[「Sean Carroll and HHMI」](#) 這個字串。

不管是蝴蝶翅膀斑點，或是果蠅胚胎發育的研究，凱洛總愛探討基因在不同物種所扮演的角色，這也是他的研究吸引人的地方。而且他每每歸功精彩之處給「演化」，也正是本書之中心議題。我相信「演化」對大部分的讀者不是一個陌生的名詞，自中學至大學的生物學課本對查爾斯·達爾文和他所提出的演化論，或多或少都有所著墨。其實，連近年來小學生喜歡看的「神奇寶貝」卡通，都大量引入演化（劇中用「進化」這個稱謂）的橋段，因此許多小學生（當然包括我的小孩）對進化朗朗上口。只是卡通中的「進化」與達爾文的「演化」差異甚大，甚至背道而馳。不過老實說，許多大學生、研究生所知道的演化論，真的比「神奇寶貝」的進化論好不到哪兒去。就我的觀察，研究生在專題報告中常對一知半解的生命現象以「某某物種演化出某種形態、行為或機制」來掩飾研讀文獻之不力。他們口說「演化」，卻提不出演化之證據，讓人覺得演化若有似無，難以捉摸。不管你同不同意、或喜不喜歡「演化」，凱洛在這本書將以DNA的證據來說服你「演化」的存在，也順道帶你認識演化的分子原理。若把達爾文比喻成一位十九世紀的刑警，只能靠著辛勤地蒐證與豐富的辦案經驗來破案，凱洛就好像二十一世紀的鑑識科學家，直接利用DNA這樣的微物證據，讓案情急轉直下，瞬時明朗。當然，讀者可扮

演法官的角色，用自由心證去研判凱洛所提供之證物的「證據力」。

我還要向讀者坦白一點：我之所以熱愛研讀演化發育的文獻，以及從事相關工作，主要是因為在那純白無瑕又變化多端的胚胎當中，可以欣賞基因的表現。至於會聯想到與演化的因果關係，都是在熱愛的情緒稍退後，回復到較理性層次時的事了。我不敢代替達爾文或凱洛發言，不過我猜他們兩位對生物形態變化的多樣性一定相當著迷，到了一個程度，他們不得不問：這到底怎麼來的？的確，生命現象之何去何從，不僅不該被忽略，更應該是波瀾壯闊的一章；這個問題的進一步探索，直指人類「我從何而來？我為何而生？」之中心議題。很可惜的是，因著意識型態之爭，達爾文的「演化論」與聖經的「創造論」長期以來都嚴重地遭到扭曲而失焦。可喜的是，凱洛以現代鑑識科學「最夯的」分子——DNA，重新詮釋演化。這是達爾文生前無法利用的證據，因為距1859年出版「物種原始」(On the Origin of Species) 至1952年賀西與崔斯(Hershey and Chase) 証實 DNA 為遺傳物質，與1953年華生與克立克(Watson and Crick) 發表 DNA 之雙螺旋結構，中間長達九十餘年之久！

跟隨著凱洛的生花妙筆一路前進，你會自覺彷彿置身於「分子博物館」內，聆聽那帶有感情的筆鋒，將標本背後的演化奧秘娓娓道來。如果你對演化尚有存疑，甚至堅決反對，我仍推薦你不妨試讀第一章——有關南極冰魚為何可在極地的海域生存的描述，因為那是我目前看過最「溫和」、也是最有趣，替演化存在說項的例子之一。或許，在讀完南極冰魚後，你就會有興趣，甚至迫不及待地想要瞭解其它章節所提到的「視錐細胞基因」、「化石

基因」、「癌細胞基因重複演化的抗藥性」等案例。對於同樣身為基督徒的讀者，不論你同意或不同意演化，容我提醒：凱洛在書中並沒有以 DNA 的證據，或以演化存在之觀點，來否定耶穌基督的信仰，以及上帝存在的權能。坦白說，這著實使我鬆口氣。而且，摒除以毫無科學根據之意識型態來否定演化的存在，才是凱洛亟欲表達的觀點（詳見第九章）。不知是巧合或是特別安排，本書首章舉南極冰魚之存在為例，末章則以大西洋鱈魚所受之生存威脅作為結尾。凱洛以演化的觀點揭露魚類可藉由 DNA 的變異而存活於冰冷的海域，然而魚類的 DNA 也可因人類的濫捕而戛然消失；演化並不因前者之誕生與後者之凋零而停止其腳步。我們應當警覺的是：濫捕所造成的海洋生態浩劫，正以超乎我們預期的速度威脅全球生物之生存。當然，人類自當無法置身其外。值是於此，與其自困於演化存在與否之爭，何不以耶穌「愛鄰舍」之精神來搶救我們生存的環境？

最後我要特別提到，凱洛這本大作之原書名依直譯應該叫做「造就最適者（The Making of the Fittest）」。經過和羅宏仁社長腦力激盪後，我們將「最適者」改譯成「贏家」。一方面因為「最適者」這個名詞很少出現在我們的日常用語，若用它當作書名，恐怕在讀者尚未開卷之前，已被文縷縷的書名給嚇跑了。另一方面，我們希望讓讀者重新思考「贏家」的真正意涵。其實，在漫漫的生物史當中到底那些物種是「贏家」呢？是那些身強力壯的物種嗎？若是，恐龍迄今仍應主宰這個世界。若不是，看來好像是那些在各自生態區位（Niche）當中活得不錯的生物。然而，真的是這樣嗎？恐怕真正的獎項是落在由 A、T、C、G 四種鹼基所組成，而且會變異、會複製的 DNA。請不要忘了：這個雙螺旋分子

正存在你、我以及成千上萬物種的細胞中，勇敢面對各式各樣的挑戰。

我要特別感謝劍橋大學麥克·艾肯教授與萊斯特大學（University of Leicester）艾略克·傑弗瑞爵士（Sir Alec Jeffreys）分別帶我進入演化發育與鑑識DNA（Forensic DNA）的領域。當我在2003年決定重回發育學的領域時，從來沒有想過這兩個看似不相干的領域，竟在凱洛的生花妙筆下產生交集！

A handwritten signature in black ink, reading '張俊志' (Zhang Junzhi). The characters are written in a fluid, cursive style with varying line thicknesses.

於2009年農曆春節的鞭炮聲中

出版序

當這本書稿送到出版社時，南極冰魚的故事立即深深吸引我。演化竟是如此奧妙，連脊椎動物賴以為生的紅血球都可以放棄！細讀內文後，心中對演化的許多疑問逐步獲得解答，而最令我驚異的是，地球上所有生命，包括現存的和已滅絕的，竟皆帶有相同的「核心基因」！它們歷經數十億年演化的淬鍊，一直留存在生物體內，多麼堅韌與偉大呀！

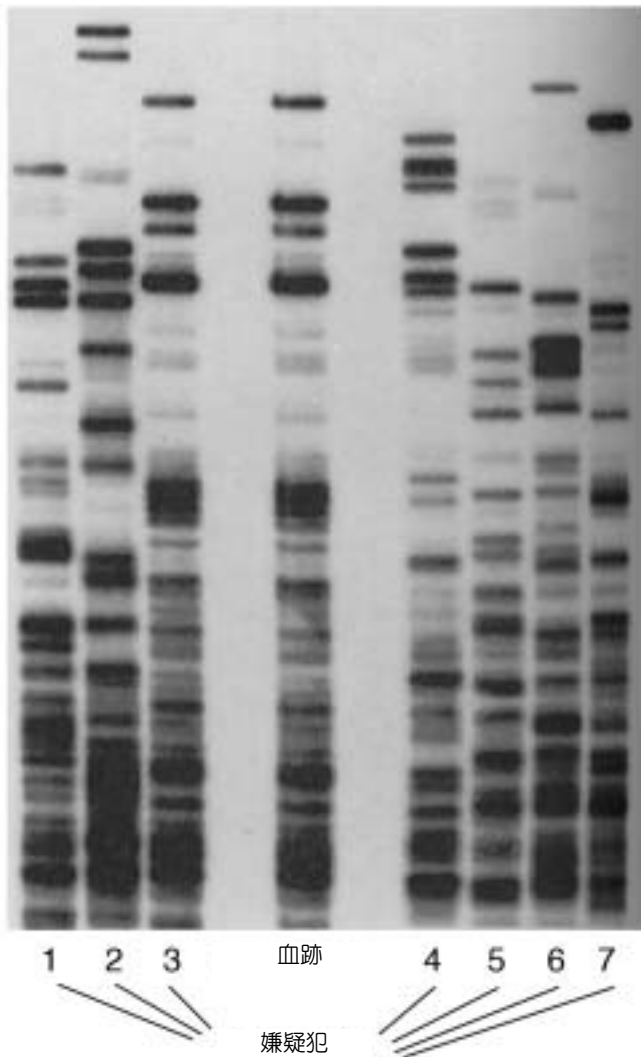
觸摸不到的分子生物對一般人來說，常覺得高深莫測。Sean B. Carroll在書中卻運用許多活生生的例子，卸除一般人對分子生物學的畏懼。雖然還是免不了會使用一些術語或專有名詞，但並不妨礙閱讀，反倒是讓有心的讀者可以進一步去了解這些術語或專有名詞。因此，也為了保留原味，原文書末的參考文獻全部登錄進來，只不過原文以穿插在文章中的方式呈現，譯者幫我們整理成表格的方式，方便查閱與對照。

希望這本書能讓對演化有興趣的讀者，透過Carroll的專業知識和平樸有趣的文筆，深入了解演化。而對剛開始想了解演化的讀者來說，把這本書當一般科普小說，讓它引領進入演化的殿堂，你的入門將超越傳統，立即跟上最新潮流。



目 錄

導讀與推薦	2
出版序	7
前言	11
第一章 緒論：布維特島的無血魚	17
第二章 演化論的日常運算：機運、天擇、時間	39
第三章 不滅的基因：跨越無垠時光的原地踏步	67
第四章 自灰燼中重生	89
第五章 化石基因：往日的斷簡殘編	115
第六章 似曾相識：演化是如何不斷重複上演？ 為什麼？	137
第七章 我們的血肉之軀：武力競賽、人類、天擇	163
第八章 複雜結構的演化和塑成	187
第九章 眼見為憑	213
第十章 懷俄明州的棕櫚樹	249
延伸閱讀和參考資料	269
致謝	293



DNA 鑑識分析。這一排一排的電泳帶狀圖樣，就是犯罪現場和嫌疑犯的DNA採樣「檔案」。血跡中的DNA電泳圖樣和第三名嫌疑犯的相符，與其他人的都不同。照片版權：Cellmark Diagnostics。

前 言

超越一切合理的質疑

「被忽略的事實不代表它不存在」

——阿爾度斯·赫胥黎 (Aldous Huxley)

1979年，懷孕九個月的戴安娜·格林 (Dianna Green)，遭到毆打，未出世的孩子死於重創，雖然她喪失記憶，在法庭上連自己的名字都拼不出來，她仍指控丈夫凱文·格林 (Kevin Green) 就是打傷她的人。於是，格林被判謀殺和意圖謀殺。

1996年，加州司法部實驗室以DNA分析這個17年前的謀殺場景。他們比較證物和格林的DNA資料，調閱最新建立的罪犯資料庫，發現這份證物和另外一名犯下四起謀殺案的兇手相符，這名兇手葛瑞德·帕克 (Gerald Parker)，當時因違反假釋規定入監服刑。面對DNA證據，帕克承認他犯下此案，之後被判死刑；格林終於獲釋了，但他已經因未犯之罪入獄16年之久。

DNA分析法比纖維或是指紋鑑定還要精確，也比目擊證人還值得信賴，它能提供決定性的證據，證明某人是否出現在犯罪現場。DNA證據的權威，加上數起和格林一案類似的案例，已經在犯罪司法系統掀起一場革命：大量使用DNA驗證，可以揪出犯人，還無罪者清白。許多發生在過去的犯罪事件，都被視為無解之謎；現在，則可以如期破案，就連數十年前的懸案也不例外。另一方面，免除罪責的人數不斷上升。例如，「無罪專案」這個組織提供貧困者與DNA證據相關的免費上訴服務。他們指出，在過去13年有150名無罪者獲釋，其中有些人甚至曾經被判死刑。

DNA化驗的威力不只表現在司法犯罪，連親緣鑑定、遺傳疾病檢驗也都托DNA科技的福。但在某個領域中，這種力量尚未被廣泛接受，這個領域稱為哲學。

每個人的DNA序列都不相同，各個物種的DNA序列也是獨一無二的。每個物種間的演化，從生理形態到消化代謝，都是來自DNA的變化，物種間的「親緣關係」也記錄在DNA上。DNA包含了演化的終極紀錄。

這點又帶來了一個有趣的矛盾：陪審團和法官依賴DNA證據決定被告有罪與否，決定上千人的命運是生是死——美國公民看起來百分之百支持這項科學發展。奇怪的是，根據民意調查，超過50%的美國民眾質疑，甚或徹底否定生物演化的事實呢！很明顯地，我們對DNA科技的應用比DNA所蘊含的演化意涵較無爭議。

一個多世紀以前，在一本繼達爾文之後的重量級演化學著作中，威廉·貝特森（William Bateson）用以下的勸戒作為開場白：「如果舊的證據幫不上忙，那我們就來找些新的證據吧，我相信現在許多博物學家已經開始認知到這個改變了。」

由於DNA科技已經滲透到日常生活的各個層面，現在正是重新出發尋找新證據的時候。本書的目標就是提出一系列新的DNA證據，以說明演化的事實。過去幾年中，生物學研究已從各種生物（包括人類和我們的近親）身上，得到大量史無前例的DNA證據。在過去二十年間，我們資料庫中的DNA序列增加到4萬倍，而且大部分都是在這個世紀初解讀出來的。換個方式來看看這個數字的意義：1982年，我們所知的生物DNA序列僅有將近一百萬個字碼，如果印在紙上，差不多可以填滿一本像這本尺寸的書。

到了現在，我們所知的DNA序列若是印成書，大概可以疊出兩座台北一〇一，甚至更高。這棟生命的圖書館每年還會增高三十多層樓呵！

的確，這些書裡所記載的原始DNA密碼能建構出各種細菌、真菌、植物、動物。然而，它們的內容卻只是由四個字母——A、C、G、T排列組合而成儘管如此，它們卻代表著演化生物學史上最偉大的機會之一。生物學家正在挖掘這項豐富的新資源，期許透過研究，以解開自然史上一些最迷人的謎團，並進一步期待能夠鉅細靡遺地揭露，自然界各種重要性狀的演化過程為何。這本書要說的故事是關於基因體學這門新科學，如何透過對各物種DNA廣泛而特別的比較性研究，來深度拓展我們對生命演化的認知。

基因體學能讓我們看到演化過程的深層內涵。達爾文之後的一個多世紀內，大家只能在雀鳥或是蛾的繁殖和生存中發現天擇的作用。現在我們可以知道，「最適者」是如何產生的，因為DNA中包含的各種資訊是達爾文無法想像的。不過，這些資訊讓他的天擇理論更加堅不可摧。我們現在可以標定DNA中特定的變化，了解這些變化如何讓物種可以適應不斷改變的環境，進而演化出新的生命型態。

這種新的認知不只提供我們鑑識證據，還帶給我們驚喜，因為它擴展我們心中對演化的想像。舉例來說，在各個物種的DNA紀錄中，我們可以找到「化石基因」的DNA片段。他們曾在生物祖先身上完整無缺，並且為生物祖先所善盡其用，但如今已衰退且變得缺乏用途。這些遺骸讓我們知道，有些性狀和能力隨著物種演化出新的生命型態而被捨棄。

DNA 紀錄同時也揭露演化能夠不斷重演。不同的物種（像是蝴蝶和人類）會經由相同的方式，進行類似或迥異的適應歷程。這證明了面對相同的挑戰或機會時，在生命史上不同的時間地點會得出相同的解答。這種重演的情形，推翻先前我們認為「如果讓生命史重新來過，結果會不同」的想法。

DNA 證據帶來了人類起源和早期文明的創新論點。雖然解讀人類的基因組已經成為主流，但是解讀其他靈長類和哺乳類的基因與基因組，卻讓我們可以解釋人類基因內容的意義。我們的基因含有許多洩露天機的線索，可以讓我們探討我們為什麼會有所不同，以及我們是如何演化成現在的樣子。許多基因帶著天擇留下的疤痕，它來自我們祖先與微生物之間的長期戰爭。數百萬年來，這些微生物一直困擾著人類的文明。

我在寫作這本書時，心中預設了好幾種讀者。對自然史有深厚興趣的第一類讀者，我將引導他們在地球上漫游，導覽他們認識許多分別適應了溫泉、洞穴、叢林、火成岩，還有深海等特殊環境的物種。告訴他們，這些物種只要改變少數幾個字碼，就可以大大改變複雜生物體的形態或生理機能。這正是這類新知彰顯演化的宏偉之處。第二類讀者是學生和老師，我把重點放在我覺得最能夠描繪出演化過程的最佳例證上，加強並擴展我們對豐富的生命多樣性和適應能力的敬畏。大部分我在書中敘述的例子尚未列入教科書，不過其中有許多將會成為演化學的重要篇章。第三類讀者是那些想要探究演化論反對者的浮誇言論與偽科學的人。對這些讀者，我會提供一些背景知識，讓他們了解那些用來質疑和反對演化論的伎倆與辯解；我還會舉出足夠的科學證據，使這些辯解煙消雲散。

新的DNA證據所扮演的角色，不僅僅在於闡明演化過程，在學校和社會大眾對演化論的接受度中，它也具有決定性地位。陪審團依賴基因變異和DNA證據決定嫌疑犯的命運，但他們卻反對教授這些證據背後的基本原則，以及整個生物學的基礎，這可不是普通的矛盾。反演化論運動建構在完全錯誤的遺傳學與演化過程的概念上，我在書中所展示的新證據，不只顯示生物演化是生命多樣性的基礎，而且我認為這些新證據可超越任何合理的質疑。



Bassett Island. Photograph by Ditlef Rustad, Norwegian expedition, 1928.

布維特島，迪特利·盧斯塔在1928年搭乘諾維吉亞號時所攝。照片來源：
《挪威南極探險的科科研成果，1927至1928年》，1935年由奧斯陸的 I. Kommissjon Hos Jacob Dybwad 出版。

第一章

緒論：布維特島的無血魚

「如果我們不再用野人看著艦艇的疑惑眼光看著生物體；如果我們看待每一種自然產物都是各自擁有歷史背景個體；如果我們認知到，所有複雜的構造和本能都是由許多對擁有者有用的精巧發明所組成，就像任何偉大的機械發明都是勞力、經驗、理性，甚至還有無數工人捅出的漏子的綜合體一般；從我的經驗看來，當我們以這種角度觀察每個生物體，學習自然史就會更加有趣！」

查爾斯·達爾文

——《物種起源》(1859出版)



圖 1.1 南冰洋地圖。李安娜·歐茲 (Leanne Olds) 繪圖。

這或許是地球上最遙遠的地方。

小小的布維特島 (Bouvet Island) 是遼闊南大西洋上的一個小點，大約在非洲好望角西南方 2,000 公里、南美洲合恩角東方 4,800 公里處 (圖 1.1)。偉大的庫克船長率領著果敢號，在 1770 年代的南冰洋探險時期，兩度試圖尋找這個小島，卻都失敗了。覆蓋著數百呎厚的冰層、邊緣是火山岩形成的險峻峭壁、平均溫度在冰點以下，此島始終是人煙罕至。

1928 年，挪威的探險船諾維吉亞號 (Norvegia) 登陸布維特島，雖然他們的目的是為了給遭遇船難的船員們設立庇護所和貯糧處，不過對我要說的故事還有自然史來說，這真是一件好事。船上的生物學家迪特利·盧斯塔 (Ditlef Rustad)，當時還是一個研



圖 1.2 冰魚。義大利南極計畫（PNRA）同意使用。

讀動物學的學生，他在這兒抓到一些外型相當奇特的魚。那些魚看起來和大部分的魚類沒什麼兩樣：大大的眼睛、寬大的胸鰭和尾鰭、佈滿牙齒的突出下顎。但牠們顏色相當淺，幾乎是透明的（圖 1.2；彩圖 A 和 B）。盧斯塔把這種動物稱為「白鱷魚」，然而經過仔細觀察後他發現，雖然牠們擁有血液，卻完全沒有顏色。

兩年後，他的同儕約翰·魯德（Johan Ruud）乘坐捕鯨船維京號來到南極。他認為船員裡有個剝皮手（把鯨魚的皮和油脂剝除的工作人員）在開他玩笑，因為那傢伙跟他說：「你知道這裡有種沒有血的魚嗎？」

既然剝皮手愛開玩笑，那就陪他玩下去，於是魯德回應道：「喔，是嗎？抓一隻來看看吧。」

身為動物生理學的高材生，魯德當時完全確信世界上不會有

這種魚，因為教科書中早已明確指出：所有脊椎動物（魚類、兩棲類、爬蟲類、鳥類、哺乳類）的紅血球中都有血紅素，這就像是動物要呼吸氧氣一樣的基礎知識。剝皮手和他的同伴辛苦了一整天，連一條 blodlaus-fisk（無血魚）都沒有抓到。魯德便把這件事當作海上傳說，拋在腦後。

隔年魯德回到挪威，對盧斯塔提起這件軼事。讓他非常驚訝的是，盧斯塔竟告訴他：「我曾經看過這種魚。」並把他在考察時拍下的照片拿給魯德看。

在接下來的二十年間，魯德沒有聽說過其他和無血魚有關的任何事情。直到有位挪威生物學家從南極探險回來，帶著他從另一個地點蒐集到的白血魚，這才再度勾起魯德的好奇心。他開始請求其他去南極探險的同事，幫忙尋找捕鯨人口中近乎透明的「魔鬼魚」或是「冰魚」。終於，在睽違了25年後的1953年，魯德再度回到南極，他希望能夠找到這種魚加以研究，以解開牠們的血液之謎。

他在南喬治亞島（1916年，探險家薛克頓為了拯救擱淺的堅忍號船員，曾划船抵達此島）設置了臨時實驗室，不久就獲得一些珍貴的標本，並小心分析牠們身上奇特的血液。他的研究報告在1954年發表，儘管那已是許多年前的事，但是對所有首次閱讀這些報告的生物學家來說，仍會造成巨大的震撼。這些南極冰魚完全沒有紅血球！在這之前，我們認為，所有脊椎動物血液中都會有這種攜氧細胞。確實，除了這十五種左右的冰魚之外，至今還沒有發現其他缺乏紅血球的脊椎動物。

紅血球中所攜帶的大量血紅素，在紅血球行經肺或鰓時，能讓氧氣附著上去，並在通過其他身體組織時，將氧氣釋放出來。

血紅素是由稱為球蛋白的蛋白質，以及名叫血基質（heme）的小分子組成，血液的紅色便是來自血紅素中的血基質，而血基質同時也是能吸附氧氣的成分。如果沒有紅血球，我們必定會死亡，所謂貧血就是缺少紅血球的狀況。就算是冰魚的近親，比如說南極岩魚或是紐西蘭黑鱈，牠們的血液也都是紅色的。

這些特殊魚類的存在引發許多疑問：牠們是從何處、在何時、以何種方式演化而來？牠們的血紅素出了什麼問題？沒有血紅素或是紅血球，牠們是怎麼存活下來的？

要發掘物種的源頭，第一個步驟多半是調查化石紀錄；然而，這類魚和牠們的近親完全缺乏這項資料，即便找到牠們的化石，殘存的骨骸也無法透露牠們的血液原來是什麼顏色、又是在何時發生了變化。不過還有一項關於冰魚的歷史資料是可以取得的——牠們的DNA。

在魯德首次檢驗冰魚血液的四十多年後，藉由研究牠們的DNA，我們得到冰魚血紅素之謎的清楚解答：通常有兩個基因和血紅素中球蛋白的合成有關，但是在這些令人驚異的魚類身上，這兩個基因早已滅絕。其中一個已成為分子化石，僅僅是球蛋白基因的殘骸——它們仍然存在冰魚的DNA中，不過已經完全失效，並漸漸消失，就像是暴露在空氣中的化石一般逐步分解；另一個球蛋白基因在紅色血液的魚類DNA中，多半和第一個基因相鄰，這個基因在冰魚體內已經完全不留痕跡。這是冰魚永久捨棄活命基因的鐵證，在五億年前，這兩個基因卻是牠們的祖先所賴以維生的。

牠們究竟是為了什麼，棄絕所有脊椎動物都奉行不悖的生活方式呢？

「需求」和「機會」——這兩項因素是海洋溫度和洋流的長期鉅變造成的。

過去五千五百萬年間，南冰洋的海洋溫度出現下降的現象，某些地方的溫度從華氏68度降到30度以下。在三千三百萬年到三千四百萬年前，地殼的大陸板塊移動，使得南極洲自南美洲尖端分離出去，完全為海洋包圍。海流隨之變化，讓南極洲周邊的海水自成一格，這個要素限制住魚類的遷徙，牠們若不能適應環境變化，就會滅亡——這正是大部分魚類的命運。其他魚類消失之時，有一群魚克服了生態環境的變化。冰魚是南極魚亞目之下的一個小科，南極魚亞目現今大約包含兩百種魚類，是南極水域的優勢物種。

南極水域的低溫對生理機能是一項重大考驗，就像我車子裡的汽油遇上威斯康辛的冬季一般，在南極冰冷的海水裡，體液的黏性會增加，難以在體內流動。大多數在南極生活的魚類，以減少紅血球密度來克服這個難題。人類的血球容積比（hematocrit; 一定量的血液中血球所占的比例）大約是45%，紅血的南極魚類的血球容積比大約是15-18%，但是冰魚把這點發揮到極致，牠們將紅血球完全去除，並接受血紅素基因產生突變而退化。這些魚的血液相當稀，只有1%的血球細胞（都是白血球），甚至可以說，牠們血管中流動的是冰水！在缺乏維生必需的血紅素下，這類生物是如何存活呢？

現在已經很清楚的是，缺少血紅素所伴隨的一整套改變，讓冰魚能在零下水溫中生存。溫水和冷水的重要差別之一就是，冷水的溶氧度比溫水高非常多，酷寒的海水是含氧量特別高的棲息地。冰魚擁有相對巨大的鰓（譯註：魚鰓相對於魚身），並演化出

沒有鱗片的外皮，上面有著非比尋常的大微血管，這兩個特徵增加冰魚從環境中吸收氧氣的能力；比起紅色血液的親戚們，牠們擁有更大的心臟和血液容積。

冰魚的心臟和一般心臟大大不同——多半是白色的。肌紅蛋白是另一種含血基質的攜氧蛋白分子，它形成脊椎動物心臟（和骨骼肌）的豔紅色澤，肌紅蛋白抓住氧的能力比血紅素大，它們將氧氣帶到肌肉備用。鯨魚、海豹、海豚的肌肉中帶有大量的肌紅蛋白，所以牠們的肌肉是褐色的；大量的肌紅蛋白，讓這些水中的哺乳類得以長時間潛水。但是，肌紅蛋白並沒有取代冰魚體內缺乏的血紅素。所有冰魚的肌肉中都沒有肌紅蛋白，其中五種冰魚連心臟裡都沒有（所以牠們的心臟才會如此蒼白）。脊椎動物體內的肌紅蛋白是由單一基因所構成，分析白色心臟的冰魚DNA會發現，牠們的肌紅蛋白基因產生突變——其中多出五碼DNA，這五碼破壞了生產肌紅蛋白的編碼程序。在這幾種冰魚身上，肌紅蛋白的基因同樣也正在邁向化石基因的階段。由於徹底缺乏兩種基本的攜氧分子，冰魚心血管系統的許多調適剛好提供身體組織足夠的氧氣。

要在嚴寒的水中生存，還需要更多改變，冰魚DNA裡多的是演化上的證據，就連每個細胞的基本結構都必須修改，以適應冰冷的生活環境。比方說，微小管在細胞內形成重要的骨架，或是稱為細胞的「骨骼」，它涉及細胞分化和運動，以及細胞外形的形成。因為微小管身負重任，組成微小管的蛋白質就在最完整的狀態下保存著，這不只限於脊椎動物，在所有真核生物（包括動物、植物、真菌）身上亦然。哺乳類的微小管在華氏50度以下會變得不穩定，如果這種事情發生在南極魚類身上，牠們就死定

了；完全相反地，南極魚類的微小管可在冰點之下正常組成，並且依舊維持穩定結構。微小管性質的這項驚人改變，是因為控制微小管生成的基因碼產生一系列變動，這是魚類適應冰冷環境的獨特機制——包括冰魚，以及牠們紅色血液的表親皆如是。

還有更多基因產生變動，才使得許多生命現象得以在冰點以下的氣候中進行。但是適應寒冷不只限於基因的改變和退化，牠們同時也發展出新的生理機制。首先是「抗凍」蛋白的發明，南極魚類的血漿中充滿這種特別蛋白質，它幫助降低魚體內的冰晶生長臨界溫度，讓牠們能在冰冷水中存活，如果缺少這類蛋白質，這些魚會凍成冰塊。這類蛋白質的結構並不尋常但卻簡單，只由三種胺基酸重複排列四至五十五次，一般的蛋白質則多半由二十種不同的胺基酸組成。生活在常溫水域中的魚類沒有這種蛋白質，所以抗凍基因可說是南極魚類的獨特發展。到底這組抗凍基因是從哪來的呢？

鄭志興（音譯；Chi-Hing Cheng）、亞瑟·迪夫利（Arthur DeVries）和他們在依利諾斯大學的同僚發現，這組抗凍基因是由另外一組負責消化酶的基因衍生而來，與抗凍完全不相關。有一小部分基因碼從該組基因脫落，移動到這些魚類的另外一個基因組上，在這一小組僅有九碼的基因碼中，延伸出另外一組形成抗凍蛋白的基因碼。抗凍蛋白的起源突顯一個很好的例子，讓我們知道演化多半是以現有的基因來拼湊——在這個例子裡是來自另外一組基因的一小部分——而不是憑空演變出新的基因碼。

同為寒冷地帶的居住者，我相當欽佩冰魚的膽量和創意。我們用盡各種方法，讓汽車能在威斯康辛冰點以下的氣溫中跑得動；而冰魚竟然是在發動的情形下進行引擎的改造。牠們發明了

新的抗凍劑；更新了汽油（血液）的等級，使其黏性大幅降低；擴大了牠們的汽油幫浦（心臟）；並一路丟棄不需要的零件——那些在各類魚體內運作了五億年的基因組。

冰魚和其他物種的DNA紀錄是演化過程的嶄新證據，它讓我們得以超越可見的骨骼和血液，直接進入演化的基礎內涵。冰魚的成功發展過程儘管有些煩瑣，在DNA層級仍描繪出成功發展為最適者的正常歷程。牠們為了應付南冰洋環境改變所做的調適，並不是一時興起的短暫作為，更不是單一方向的漸進過程，而是許多步驟即席拼湊成的一系列改變，包括：一些新基因碼的產生、老舊基因碼的摧毀，還有許許多多其他的改良。

比較不同的冰魚、牠們的近親，以及其他南極魚類的基因狀態，我們可以發現在不同的演化階段中基因的變化情形。總共約兩百種南極魚亞目的魚類都有抗凍蛋白基因，所以這是較為早期的演變，微小管基因的變化也是在此時產生。但是僅僅十五種左右的冰魚有血紅素化石基因，這表示冰魚首度分化出來時，便遺棄了血紅素基因。再者，有幾種冰魚無法產生肌紅蛋白，但其他的冰魚卻可以，由這點可以看出肌紅蛋白基因的發展，比冰魚的起源還要晚，而且目前還在演化中。藉由檢驗各個物種的DNA序列，我們可以將這些演化上的事件，對應到南大西洋的地質年代表中——配合兩千五百萬年前演化出的南極魚亞目的魚類，以及八百萬年前演化出的冰魚（圖1.3）。DNA紀錄告訴我們：冰魚由常溫、依附血紅素的生活型態，轉變成冰水、毋需血紅素（有的甚至不需要肌紅蛋白）的生活型態，是經由逐步演化，而非一蹴可及。

從紅色血液、生長在溫暖水域中的冰魚祖先綿延相傳到冰

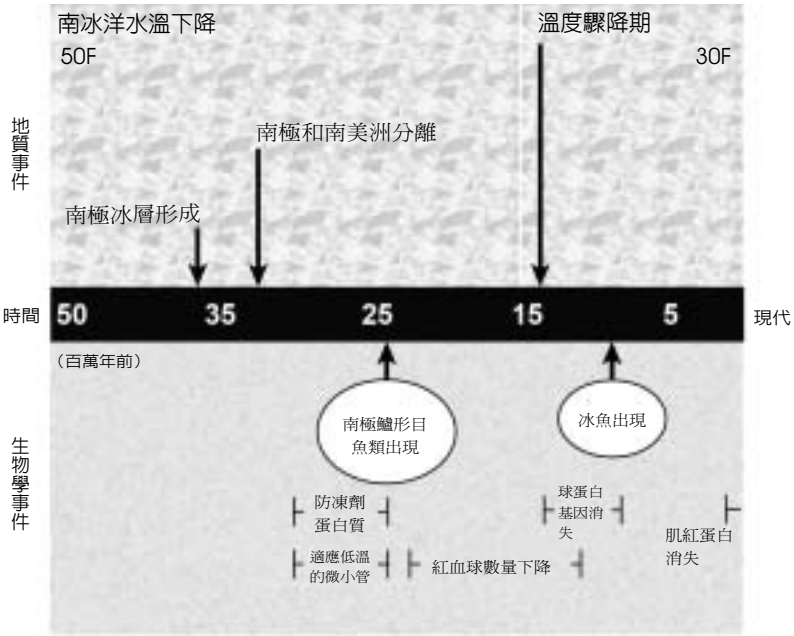


圖 1.3 冰魚演化的時間軸。(上排) 南極大陸的地質變化，在過去五千萬年間，帶來洋流和水溫的重大改變。(下排) 南極魚亞目的魚類爲了適應較低的水溫，演化出抗凍蛋白質、在低溫中穩定的微小管，還有低血液容積比。最後，冰魚共同祖先的球蛋白基因化石化。李安娜·歐茲繪製。

魚，這個長期演化過程累積而成的DNA紀錄，活脫脫便是演化的兩個關鍵原則——天擇和傳承變異的展現。這兩個原則最早是由另一位動物學學生查爾斯·達爾文主張的，他環繞南大西洋航行的時間，早了盧斯塔和魯德一個世紀。我將在這本書中描述新的DNA紀錄，為了完全品味這個紀錄的力量，以及它在演化過程中的地位，我們有必要重新理解達爾文這兩個原則，還有它們最初在《物種起源》的敘述。