



抗旱城市

光環不再

撰文／克朗哈（Casey Crownhart）

攝影／漢莫（Justin Hamel）

翻譯／連育德

艾爾帕索市長年節水有成，為人所稱道；
如今在氣候變遷的影響下，它的適應能力逐漸被逼至極限。

秋收前夕，這天下午天氣暖和，來到距離德州艾爾帕索市（El Paso）約20哩外的郊區，泰瑞斯（Ramon Tirres Jr.）開著卡車轉向，左右兩邊都是農地，卻一片荒蕪。這兩塊田占地70英畝，原本現在應該長滿了棉花，卻跟他總共將近1,000英畝的農地一樣，今年只能棄耕。算下來，他的棉花田約有三分之二都荒廢了。

泰瑞斯在這裡務農已經47個年頭，炎熱氣候適合他栽種的胡桃樹，他的農田位於這片山谷裡，土壤肥沃，但少了水，一切都是枉然，過去這幾年的水荒更是嚴重。

泰瑞斯和鄰居的灌溉水源大多來自於格蘭河（Rio Grande），這條河的源頭在科羅拉多州南部高山，蜿蜒流經新墨西哥州，沿著德州與墨西哥邊境流經此地。但遇到像今年這樣很少下雪下雨的年頭，水源短缺。泰瑞斯是可以抽地下水來應急，但成本很高，也不是所有農地都有抽水機。



農民是當地水荒的最大受災戶，但他們會落入這個困境，其實並不意外，畢竟艾爾帕索位於德州西部一端，緊鄰契瓦瓦沙漠（Chihuahuan Desert），每年降雨量只有9英吋，遠遠低於全國平均的約30英吋。

然而，艾爾帕索長年來是節水有成的模範城市，70萬民眾找到在沙漠生活、甚至欣欣向榮的一套方法。放眼全球各地，人口成長與氣候變遷逐漸導致水資源面臨短缺壓力，其他城市多年來紛紛向艾爾帕索取經。

艾爾帕索能做的事都做對了，除了發起各種計畫說服民眾減少用水，還部署技術系統（包括鹽水淡化與廢水回收）增加水資源。這些因應措施耗資幾億美元，讓艾爾帕索的規劃能力在國際上贏得美名。當地水利公司的前總裁更曾公開宣稱，艾爾帕索是座「抗旱」城市。

只不過，艾爾帕索縱使有詳盡的抗旱計畫，近來也一再面臨嚴重乾旱的考驗。隨著氣候變遷加速，各城市爭相設法因應，科技顯然是解決之道，能夠改善缺水地區的生活品質，避免民眾外流。然而每一種新措施都有代價，也都可能把某些人排除在外。隨著水資源的壓力愈來愈大，艾爾帕索和其他缺水地區讓我們不得不問：因應措施究竟可以做到什麼地步？

象山水庫（Elephant Butte Reservoir）是象山水壩（Elephant Butte Dam）所形成的人工湖，座落於艾爾帕索以北約2個小時車程的山區。水庫裡的岩石有一條水位刻度，就跟浴缸的水痕一樣。科羅拉多州山上的融雪先流到水庫，再釋放到河



這樣的水井散落在泰瑞斯的農地，河流供水不足時，可以從水井抽水補充。地下水的成本較高，但乾旱時可以維持作物生存，也能拯救他的生計。



裡，經由美國墾務局（Bureau of Reclamation）分配給新墨西哥州與德州的不同灌溉區，最終來到泰瑞斯的農地。

現在的水位遠遠低於刻度位置，四周暴露出好幾百英呎的岩石與水壩。10月時，水庫蓄水率只剩5%左右。

過去100多年來，象山在多數時候為南方這片流域帶來穩定水源，「但偶爾會出現好幾年的嚴重水情，就跟現在一樣，」象山發電廠主管卡明森（Ben Kalminson）說，水庫這時就會見底。

2020年1月到2021年8月期間，美國西南部經歷罕見乾旱，雨量只有約17英吋，低於20年平均值的24英吋。根據氣候模型，要發生2020年的低雨量，機率只有約2%。美國國家大氣中心（National Center for Atmospheric Research）氣候研究員辛普森（Isla Simpson）表示，換算下來，2020年乾旱是50年難得一見的事件。

辛普森也說，沒有證據顯示氣候變遷是造成雨量短缺的原因，因為乾旱每隔一段時間就會發生，但如果再考量高溫因素，乾旱的嚴重程度與氣候變遷所扮演的角色就更加顯著。

由於熱空氣的含水量高於冷空氣，氣溫愈高，水分蒸發愈多。這個效應可以透過蒸氣壓差（Vapor Pressure Deficit）測量，亦即大氣含水量最大值與含水量實際值的差異。蒸氣壓差高，代表空氣亟需水分；而乾旱的影響預計更加嚴重，因為水氣會更快從河流、湖泊、土壤、甚至植物蒸發。

根據氣候模型，蒸氣壓差要達到西南部在2020年的程度，機率只有約0.4%，因此這差不

多是每200年一遇的事件。辛普森說，沒有氣候變遷的推波助瀾，根本不會這麼嚴重。隨著氣溫升高，高蒸氣壓差的情況將更加常見：2030年前，西南部的蒸氣壓差每10年就會出現2020年的高數值，「我們走到了臨界點，開始在現實生活看到氣候變遷的訊號，」辛普森說。

農家從格蘭河引取灌溉水，艾爾帕索市民的飲用水則是鑿取自地下的含水層，但這個重要的水源同樣岌岌可危。

1979年，德州水利發展局（Texas Water Development Board）預估，艾爾帕索在2031年前將無地下水可用。當年，市民人均每日用水量超過200加侖，用水大多抽取自當地的2個含水



1994年6月到2013年7月，乾旱嚴重影響象山水庫的水位，比較前後衛星圖就能明顯看出。

「我們走到了臨界點，
開始在現實生活
看到氣候變遷的訊號。」



層，一個是東邊的休可盆地（Hueco Bolson），另一個是西邊的梅西拉盆地（Mesilla Bolson）。

往後20年，水利局發起宣導活動，鼓勵民眾減少用水量，例如草坪改種本地植物等等。現在的人均每日用水量已降至134加侖，雖然仍舊高於全國平均（82加侖），但小於國內其他乾燥氣候的地區，例如亞利桑那州（145加侖）與猶他州（169加侖）。

影響所及，含水層的狀態稍有改善。「水位還是在減少，但不是劇烈下降，」艾爾帕索水利公司的資源處主管雷納特（Scott Reinert）說。儘管如此，含水層仍舊是供水多、進帳少。

艾爾帕索水利公司每年從休可盆地抽取4萬到5萬英畝英呎的地下水，替換約5,000英畝英呎的水。英畝英呎是各家水利公司的水量單位，相當於1英畝地（略大於半個足球場）1英呎深的水量。其他地下水與格蘭河也會補注水量，但恐怕趕不上抽水速度。

艾爾帕索水利公司計畫抽取地下水至少再50年，但有些研究人員認為，休可盆地的水源可能會提早耗盡，尤其艾爾帕索還不是唯一仰賴這處水源的城市。

墨西哥的華雷斯市（Juarez）緊鄰格蘭河，位於艾爾帕索的正南方，目前人均用水量約為艾爾帕索的一半，但由於人口不斷增加，水源又幾乎全部來自於休可盆地，因此對含水層的水位也有重大影響。

德州大學艾爾帕索分校土木工程專家梅爾（Alex Mayer）說，在2個城市又抽水、人口又成長的情況下，有些地下水井再過40年左右可能開始乾涸。但問題可能不必那麼久就會浮出檯面，因為抽水頻繁已經逐漸影響地下水的水質。

泰瑞斯跳下卡車，走向一根狀似電線桿的裝置。他打開鐵箱，啟動開關，抽水機轟然作響，



艾爾帕索斥資幾億美元打造水利技術系統，包括鹹水淡化（左）與廢水回收（右），也發起各種計畫說服民眾減少用水。

只見水管噴出淺褐色的地下水，流進繞著田地周圍的混凝土水道。

河流供水不足的時候，泰瑞斯可以從這樣的水井抽水補充。水井散落在他的農地，從深達幾百英呎的地底抽水。地下水的灌溉成本雖然比河水更高，但遇到乾旱時，卻可以維持作物生存，也能拯救他的生計。

泰瑞斯鑽回卡車，掏出自己用塑膠水瓶下

半部做出的採樣杯，還有一個看似腎上腺素注射筆（EpiPen）的裝置。讓水井抽水幾分鐘後，他把採樣杯裝滿水，將筆型裝置的一頭浸在水裡。

裝置上頭有個小螢幕，顯示數字愈來愈高，讓泰瑞斯看了直搖頭。這個裝置能夠偵測電流在水裡流動的狀態，藉此測量出含鹽量，結果數字顯示2,400ppm（百萬分點濃度），高於2年前暑假的1,600ppm。

鹽分濃度過高，核桃樹尤其容易受損，長得雜亂，果實又結得少。泰瑞斯注意到，有些樹林邊緣的幾棵樹看起來有點病奄奄。他一臉擔心，因為地下水如果含鹽量太高，他就沒辦法用來灌溉作物。

休可盆地蘊含約1,000萬英畝英呎淡水，以及3倍多的半鹹水。每次有抽水機抽取淡水，鹹水就愈來愈靠近城市。

艾爾帕索的天然地下水原本從北沿著格蘭河南流，卻因為抽水行為而倒流。地下水流動緩慢，幾10年才會看到明顯變動，但如果農家與大型城市用水戶維持現在的抽水行為，半鹹水最終會多過剩餘的淡水，整個地區的水井只好作廢。

艾爾帕索不等淪落到那個地步，正在設法將半鹹水加以利用。

應用鹹水在過去幾乎是不可能的任務，但20世紀發展而成的逆滲透與其他過濾技術，帶來新的可能性。

鹹水淡化占全球人類用水量的一小部分，但比重正在增加。2005年到2018年間，全球鹹水淡化產能增加了2倍，目前將近有3億人的用水來自於淡化廠。多數淡化廠鄰近海邊，約有6成淡化廠將海水脫鹽，而近半數淡化產能位於中東與北非。但在2007年，艾爾帕索啟動全球



最大的淡化廠，希望善加利用休可盆地含水層的半鹹水。

「我們是有需求就生產的淡化廠，」廠長路易茲（Art Ruiz）邊說，邊帶著我走進中控室，裡頭的監視器監測著水流、水壓和馬達速度。透過遠端那面牆的窗戶，可以看到造價9,000萬美元的淡化設施，

所處的建築物比高中體育館大不了多少。水管與馬達整齊排列在一面牆，上頭掛了超大的美國國旗。聽到嗡嗡聲，才知道廠房正在運作。

路易茲說的「有需求就生產」，是指淡化廠在用水高峰期能夠增加產量，例如酷暑或聖誕節等假日，因為大家在家時間變多，用水量也跟著增加。產能全開時，淡化廠每天可生產逾2,700萬加侖的淡水，但多數時候的產水量少很多，只占全市用水需求的5%左右——艾爾帕索每日用水需求達8,500萬到1.45億加侖不等。

這座淡化系統採用逆滲透技術，使用壓力讓半鹹水穿過薄膜，上頭的孔隙小到連鹽分都穿不透。淡化過程的成本高昂。抽地下水再消毒的成本每英畝英呎約250美元，反觀將半鹹水淡化的成本要多出近2倍，約700美元。

儘管成本不菲，淡化地下水已成為艾爾帕索的關鍵水源之一，也是重大的應變計畫，為未來預先做準備。為了讓供水相對不受乾旱早期所影響，艾爾帕索進行了兩個主要基礎建設，一個是這座淡化廠，另一個的企圖心更大。

愈來愈多水資源管理公司把焦點轉向廢水，認為廢水處理完後，可以成為寶貴的資源。美國西部陸續有新型廢水回收廠正在興建，最受人注目是位於南加州、造價幾10億美元的廢水回收廠，計畫在2030年前後啟動。

艾爾帕索處理與回收部分廢水已有幾10年的歷史，處理過的廢水用來灌溉公園草坪與高



市政府已將廢水用於公園與高爾夫球場；RR布斯塔曼特廢水廠（RR Bustamante Wastewater Plant）副廠長說得委婉，這些廢水已經經過淨化，處理掉「市民的有機物」。

爾夫球場，或者是冷卻工廠與發電廠的設備，淨水如今大多重新注入含水層。不過艾爾帕索水利公司技術長崔卓（Gilbert Trejo）懷抱更遠大的願景。

直接飲用再生水（Direct Potable Reuse）又稱「馬桶到水龍頭的水回收」（Toilet-To-Tap Recycling），是廢水回收技術的極致。從淋浴、水槽、乃至於馬桶所回收的廢水，經過一般程序處理，分離出固體、氯消毒，接著進一步處

理，包括過濾、二度氯消毒與紫外線消毒，最後再輸到市內各個家庭，用於廚房、浴室與花園。

現在的水回收系統多數會經過湖泊、河流等天然來源，很少有據點使用直接飲用再生水技術。納米比亞有個處理站是目前營運最久、規模也最大的據點。崔卓說，艾爾帕索目前正在設計一座處理廠，規模預計是美國最大，計畫2025年開始營運，造價約1億美元。

崔卓希望，新廠將提供另一個穩定的水源，

展望未來幾10年，
艾爾帕索還不至於完全無水可用，
只是水源可能更難取得，
成本更高。

在水位低落時減輕含水層的負擔。居民大致接受這個構想，如果有人不認同，通常也是反對成本過高，而不是覺得「噁心」。但這項計畫並非萬無一失。8月時，兩條將水輸送到現有回收廠的輸水管在城市西區破裂。

這兩條輸水管原本應該互為備用，結果同時破裂，導致廢水倒流到住家的浴缸與庭院。隨著輸水管每天出現更多裂痕，艾爾帕索必須找到能夠容納廢水的地方，只好把腦筋動到格蘭河，只有這裡每天可以容納幾百萬加侖的洩漏廢水。

展望未來幾10年，艾爾帕索還不至於完全無水可用，但要滿足城市所需，只會更加困難，成本也會更高。鹹水淡化與廢水回收等技術，固然有助於解決問題，但隨著情況日益險峻，許多人賴以生活的解決方案將愈來愈複雜。這些系統高度工程化，如果把規模擴大，往往也可能衍生出新的風險，例如先前必須直接將未經處理的廢水抽到河裡。

艾爾帕索市政府官員未來將繼續設法未雨綢繆。事實上，艾爾帕索水利公司已買下約6萬6,000英畝的土地，地點位在德州戴爾市以東90英哩處。這片土地擁有水權，如果艾爾帕索自己的水資源用罄，該公司計畫在戴爾市鑿井，把水抽回艾爾帕索。

把水從戴爾市抽回艾爾帕索再處理，每英畝英呎的水需要3,000到5,000美元，成本是廢水回

收的至少1倍以上，更是抽取地下水或格蘭河地表水的10倍以上。

這些高成本的解方不久預計反映於市民的水費。崔卓說，調漲水費也只是用來維持既有系統。

對有些人來說，漲幅不會太大，2021年的調漲內容涵蓋水費、廢水費與暴雨汙水處理費（Stormwater Fee），人均每月增加1.37美元。低用量家庭享有豁免，可望有助於無法負擔的民眾。艾爾帕索約19%的民眾為低收入戶，高於全國的約12%。

崔卓說，這次只是第一波調漲。有民眾抗議未來還要調漲水費，但水利公司沒辦法再延遲。「艾爾帕索的水費只會愈來愈貴，」他說：「而且很快就會上調。」

河流對岸的姊妹市華雷斯市，同樣面臨水供應逐漸吃緊的問題，基礎建設可能需要類似的整修與升級，但資金更是短缺。

能夠在沙漠保持水源滾滾不斷，這些調整似乎只是小小的代價，然而隨著人口增加、乾旱期拉長、地球持續暖化，未來的挑戰愈來愈艱鉅。

時序進入2022年，美國西部的氣候預計再度出現反聖嬰現象，冬季可能不下雨，水庫又是不見進帳的一年。無論是泰瑞斯和其他小農，還是艾爾帕索市政府官員，仰賴格蘭河為生的民眾可能也得不到預期的配水量。

儘管水荒嚴重，許多市民還是會選擇固守家園。泰瑞斯計畫一直耕種下去，他說自己身上留著農家子弟的血液。在沙漠耕作雖然可能更加艱苦，但本來就沒有輕鬆的一天。

「農人自古以來就是跟天氣對抗的命，」他說：「適應就好，也不得不適應。」■

克朗哈（Casey Crownhart）是《麻省理工科技評論》的編輯研究員。

Copyright©2021, Technology Review. All Rights Reserved.