

美國加州乾旱事件探討

傅鏗漩¹、呂喬茵¹、朱容練¹、張志新¹、潘昱仁²

¹ 國家災害防救科技中心

² 國立暨南大學土木系

摘要

美國加州此次乾旱源自 2012 年起，已經持續發生四年之久，部分地區乾旱情況因降雨而有所趨緩，或部分地區在過去四年當中旱象亦趨嚴重惡化。加州是全美國生產毛額最高的州，農業耕種面積廣受到乾旱的影響更顯著。當地氣候因長期高壓壟罩和高山雪線退移使得降雨及融雪減少，造成用水供不應求；自 2014 年起 70% 加州的土地呈現 D3 等級極端乾旱(Extreme Drought)，至今年 2015 年大多數的加州都陷入了 D3 等級極端乾旱(Extreme Drought)和 D4 最嚴重的罕見乾旱(Exceptional Drought) 階段；連加州最大的水庫-Shasta 水庫，因乾旱關係，水位持續下降，水庫周邊乾涸土地面積變大。乾旱造成的衝擊不單單只是用水短缺，還影響其他層面，故本文探討美國加州乾旱，以了解美國對於乾旱事件中遭受的衝擊影響以及乾旱因應對策方式。

一、前言

美國國家環境資訊中心(National Centers for Environmental Information, NCEI)統計 1980 年至 2014 年全美國境內所有災害情況，本文從中取得經濟損失十億美元以上的美國乾旱年度資料，其中 1988 年乾旱事件造成 400 億美元損失最高(圖 1)，其次為 2012 年乾旱造成 310 億美元，排序第三為 1980 年 290 億美元。



圖 1. 美國損失十億以上之乾旱年度 (NCEI、災防中心彙整)^[1]

圖 2 為洛杉磯時報(Los Angeles Times) 使用美國乾旱指標(表 1) 做出的加州乾旱時序，時間起源為 2011 年至 2015 年，隨著時間越來越多的行政區從黃色異常乾燥 D0(Abnormally Dry)或中度乾旱 D1(Moderate Drought)，2014 年加州的乾旱分布呈現極端乾旱 D3(Extreme Drought)，至今年 2015 年大多數的加州都陷入了極端乾旱 D3(Extreme Drought)(紅色)和罕見乾旱 D4(Exceptional Drought)

(暗紅)階段。根據美國乾旱監測結果顯示:加州乾旱從 2000 年至 2015 年乾旱各類型之面積百分比, 2015 年 1 月 94%的土地都處於劇烈乾旱 D2(圖 3), 其中 40%土地面積屬於罕見乾旱(D4)等級(超過 50 年以上頻率年的乾旱程度), 而此情況遠超過 2014 年及過去 15 年乾旱結果。

表 1. 美國乾旱指標五等級^[3]

乾旱等級	描述	可能影響
D0	異常乾燥(Abnormally Dry)	短期乾燥使得作物/牧草生長減緩 仍有缺水情況使得作物/牧草沒有完全恢復生長
D1	中度乾旱(Moderate Drought)	對作物/牧草造成傷害 河流/水庫/水井的水位降低 即將發生缺水情況 自主性限水
D2	劇烈乾旱(Severe Drought)	可能發生作物/牧草損失 缺水情況 強制執行限水利用
D3	極端乾旱(Extreme Drought)	發生作物/牧草損失 普遍性缺水情況 強制執行普遍性的限水利用
D4	罕見乾旱(Exceptional Drought)	發生普遍性作物/牧草損失 水庫/河流/水井發生缺水緊急情況

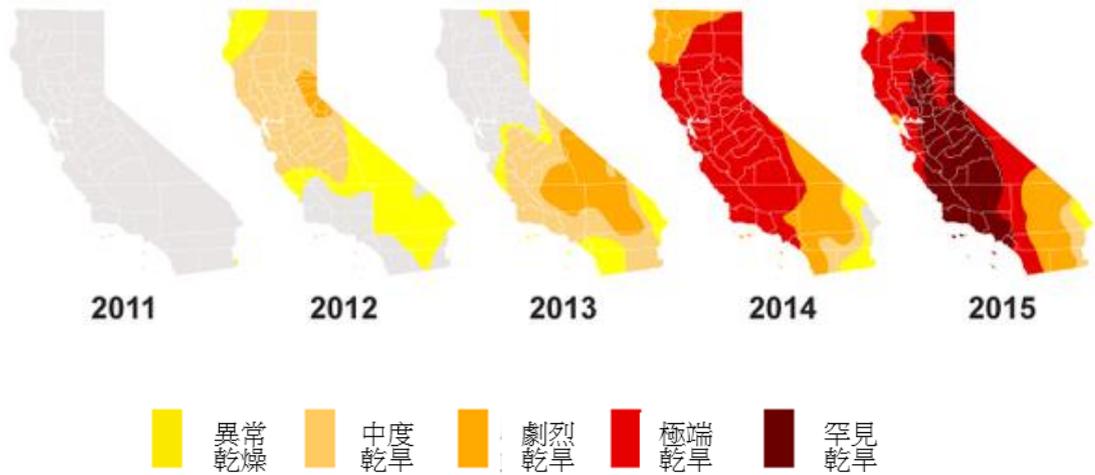


圖 2. 2011-2015 加州乾旱等級變化^[2]

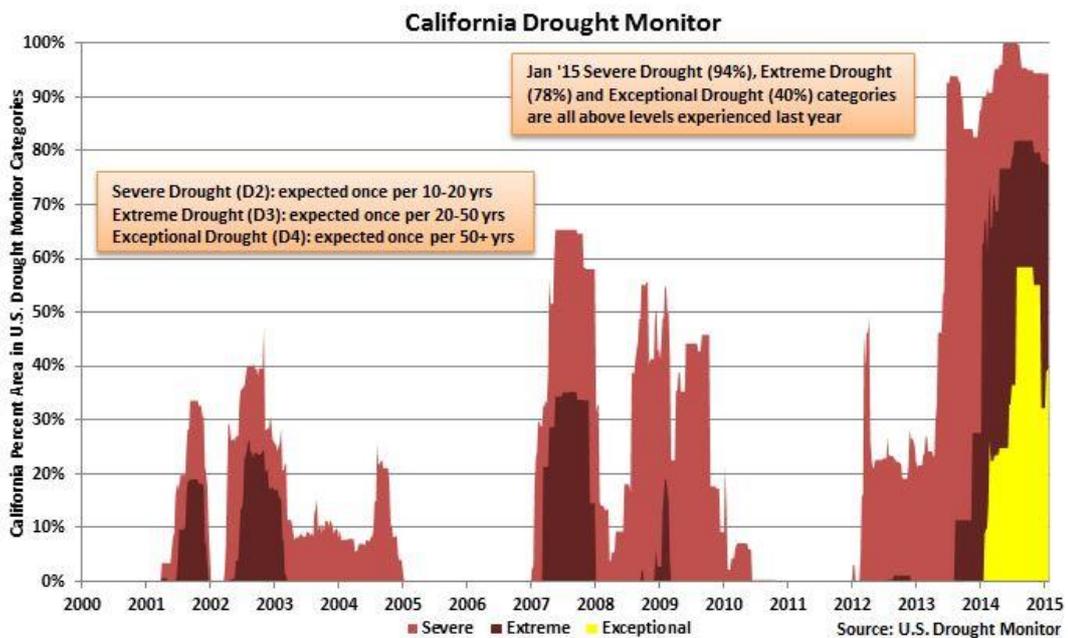


圖 3. 加州乾旱等級百分比(U.S. Drought Monitor)^[3]

註:圖 2 與圖 3 繪製乾旱等級之色塊並不一致，請參考各圖之圖例。

二、 加州乾旱概述

美國加州(State of California)位於美國西部一州，加州西側臨太平洋，加州面積是美國第三大州，大多數城市位於太平洋沿岸較涼爽的地帶，包括舊金山、洛杉磯和聖地亞哥。加州是美國人口最多之州，人口分布為南加州大於北加州，其中南加州 10 個郡之總人口約為 2300 多萬，占加州總人口的 61%。

根據 2010 年的統計數據，加州 GDP 占全美的 13.34%，達 19364 億美元，為全美最高，而加州經濟的主體是農業位於中央谷地，但農業的規模是加州第二大產業(加州第一大產業為矽谷科技產業)。其他重要的產業包括航空、娛樂和輕工業，及礫砂開採。

加州年平均降水約 580 毫米，主要雨季在 11 月至隔年 3 月，佔全年 75%之雨量，而降雨分布南北大不同，降水主要集中在北加州，而南加州年平均約 50 至 250 毫米。從降雨分布與人口分布可得知二者間分布相反，人口稠密和經濟發展主要集中在南加州，但南加州降水量卻不足，已導致水資源短缺，因此加州政府在 1950 年起開始計畫「加州北水南調工程」，欲從北加州舊金山灣上游的三角洲地區引水至南加州，以解決北澇南旱的水資源不均問題，在 1960 年經過全民公投通過後便開工，主體工程於 1973 年竣工，1990 年達到設計輸水能力，輸水幹道全長約 1060 公里，整個調水工程中建有 28 座大

壩和水庫，22 座抽水站和一些發電站，年調水量近 50 億立方米，調水量用於城市與灌溉農田的比例約 7:3，受益人口達 2300 萬，是目前世界上最大的調水工程。

加州最大的水庫-Shasta 水庫位於 Sacramento 河上游，庫容 56 億立方公尺，水庫的水主要來自冬季的降雨，此地區的冬季降雨量幾乎接近水庫的蓄水量，以供應春夏大量用水的需求。

乾旱的嚴重情況也可以從 Shasta 水庫的水位變化中看出，從 2010 年以來水庫水位持續下降，到 2014 年更為嚴重，根據 Earth Observatory 網站提供的衛星影像照片(圖 4)，可以看出在 2005 年 9 月庫區影像(水位 309.4 公尺)與 2014 年 9 月庫區水位(水位 278.3 公尺)的差異，水庫周圍明顯多出一圈露出的土壤顏色。

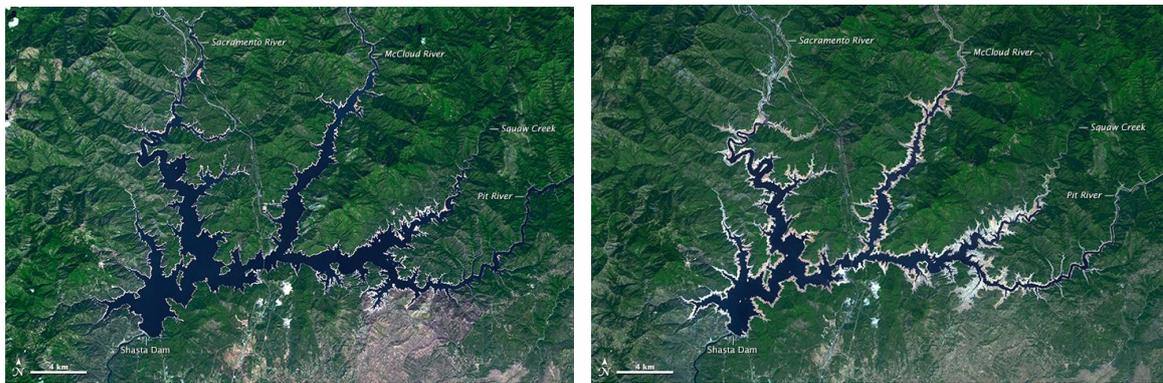


圖 4. Shasta 水庫衛星影像圖(左圖 2005 年 9 月、右圖 2014 年 9 月)^[4]

依據加州水資源部門(Department of Water Resources, CA)的資料交換中心(California data exchange center)所提供自 1976 年起的月水位資料紀錄中，目前的水位僅高於 2014 年 9 月到 12 月的水位紀錄(圖

5)。1982-1983 年溼季水位最高，2010-2011 年的水位紀錄與其接近，幾乎到達最高水位，而水位從 2011 年後一路下降，近五年以去年(2014)同一時期的水位最低，但是去年(2014)在進入冬季雨季後，水位就開始上升，但是今年(2015)水位截至目前(12 月 7 日)資料還沒開始上升，12 月 5 日的資訊顯示 Shasta 水庫蓄水約 29%(圖 6)，水位低於 1976-1977 年乾季最低水位，面臨嚴峻的乾旱情況。

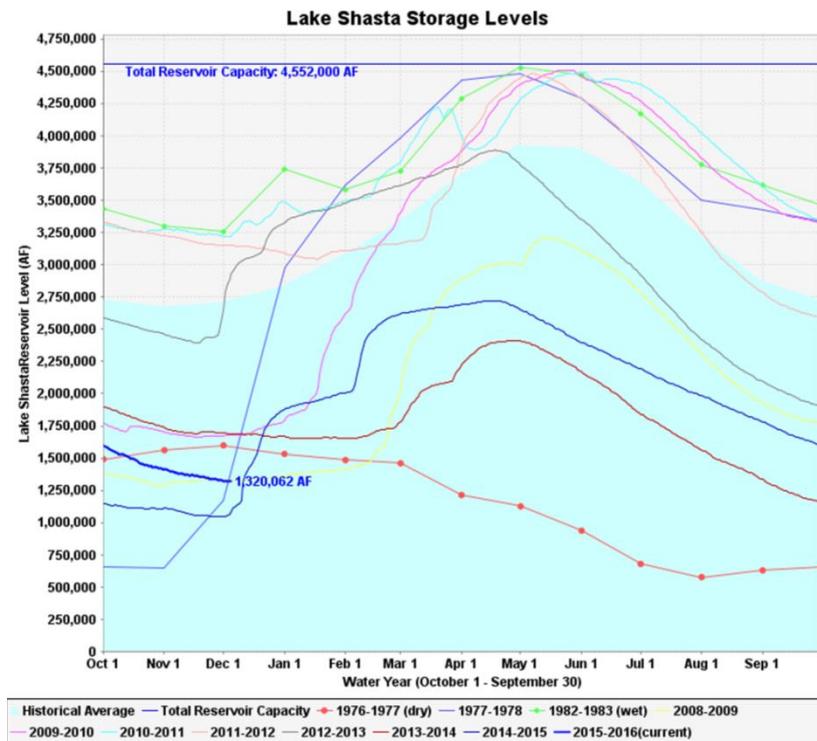


圖 5. Shasta 水庫現在水位與歷史水位比較圖(California Department of Water Resources)^[5]

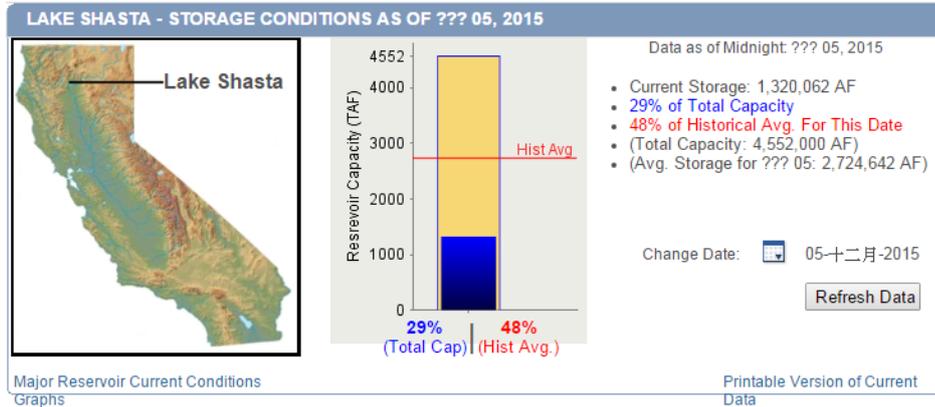


圖 6. 2015 年 12 月 5 日的水庫容量(California Department of Water Resources) [5]

三、 加州乾旱原因

(一)長期高壓壟罩

觀測資料顯示，近年來加州長期處於高壓籠罩的狀態(圖 7)，研究指出，此高壓系統為” Triple R” 環流結構的一環。Triple R 是存在於大尺度環境中一負-正-負的環流結構，由副熱帶太平洋經過加州、夏威夷並延伸至阿拉斯加北部，該環流結構於 2014 年一月時達最大強度，其中高壓結構的部分長期駐留於加州上空，導致暴風路徑北抬且加州地區處於下沉氣流區而降雨不易，使當地乾旱情況持續惡化 (Stanford News)。

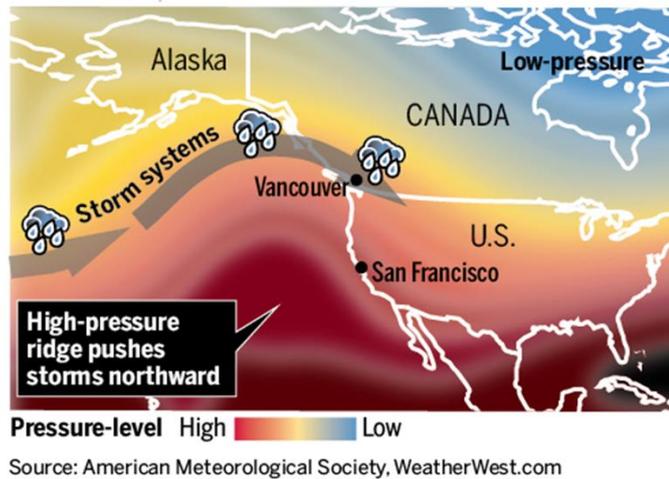


圖 7. 加州高壓籠罩示意圖 (American Meteorological Society, WeatherWest.com)^{[6] [7]}

(二)高山雪線退移

在美國融雪是供應淡水的關鍵條件，而融雪佔加州 70% 的降水量 (正常情況下)，因此融雪是加州主要的水源之一。但因氣溫上升的關係，促使降雪減少，使得水資源供給受限。NASA 在加州東側圖奧勒米河(Tuolumne)流域比較積雪量情況，圖奧勒米河是主要供給加州重要的灌溉區，也是供應舊金山和周邊社區，而圖 8 為美國 NASA 拍攝加州與內華達州得積雪的影像，左為 2010 年影像與圖 8 右為 2015 年皆為當年度 3 月影像，由色差明顯發現，山區積雪明顯減少。而圖 9 為圖奧勒米河流域 2014 年與 2015 年雪水量的比較，當紅色區塊愈多和愈深，表示 2015 年雪水量相較 2014 來得更少，反之，藍色區塊越多表示 2015 年來得多。



註:2015 右側白色部分為雲

圖 8. 奧勒米河流域影像圖(左:2010 年; 右:2015 年)^[8]

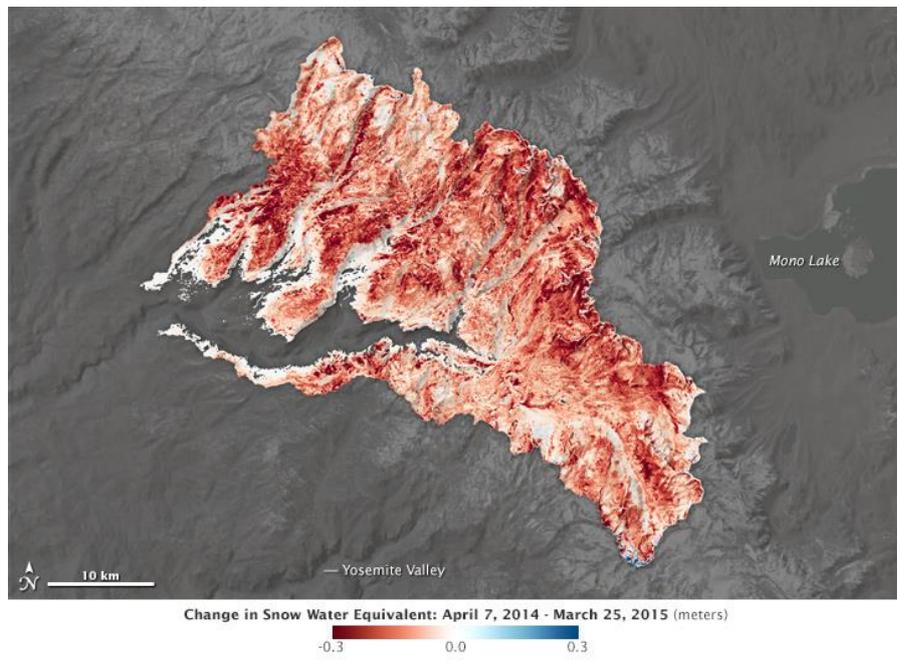


圖 9. 奧勒米河流域積雪量比較^[8]

四、 加州乾旱應變作為

(一) 節約用水政令宣導

2013 年 9 月起乾旱加劇，2014 年 1 月發布乾旱應變啟動，透過州政府發布宣導節約用水，其內容包括：家戶用水減量，每戶購買所需的水量，倘若用水量增加，其水價因有所加乘；另外，用水超過制定違規罰則，第一次超量施行警告，超過二次以上施行罰鍰並安裝截流器甚至強制停水；而家戶外的草坪和景觀用水，水量削減或暫停供應；在報章媒體上倡導節約用水觀念和免費節約用水教育訓練課程。

(二) 用水轉移介紹

美國加州由於降雨分配不均，且人口分布南大於北的情況下，缺水可分三種供水階段(圖 10):1.緊急用水階段:水轉移時間為三個月以下，主要水源以休耕或轉作用水支應；2.短期用水階段:係指三個月至一年用水時間，主要水源來自節水或水庫剩餘水；3.長期用水階段:時間長度為一年以上，主要水源來自節水或水轉移之水。取得水資源的方法眾多，而用水轉移便成為長期缺水期間，水資源供應的來源之一，用水轉移最常用在加州農田間灌溉用水的轉移，1991 年加州水資源機構辦理短期水轉換，並成立加州水資源部門(Department of Water Resources, DWR)，購買農業用水轉移至缺水特定區使用，至 1992 年漸漸發展地區性用水轉移，不過加州用水轉移指的是用水量

的轉移，並非水權的轉移。



圖 10. 加州用水轉移協調所(San Joaquin River Water Authority

Exchange Contractors & 災防中心彙整)^[9]

(三) 加州乾旱應變網頁

加州政府建置網站(California DROUGHT)紀錄本次乾旱事件，如下圖 11 所示，且主動說明各項因應措施，包括從 2013 年、2014 年的政策措施，2015 年每個月的乾旱情況說明，今年 12 月的更新紀錄顯示，加州居民在過去五個月來已經降低的 27% 的用水量，然而嚴峻的乾旱現象依舊持續並未解除。



圖 11. 加州政府建置之乾旱紀錄網站(California DROUGHT)^[10]

美國彙整各單位(縱向)提出的計畫，及該計畫可以幫助的對象(橫

向)，各單位計畫包括州政府的各部門與聯邦政府，共計 50 個計畫，如下圖 12 所示。州政府包括：水資源部門 California Department of Water Resources (DWR)、環境保護署 California Environmental Protection Agency (Cal/EPA)、緊急應變辦公室 California Governor's Office of Emergency Services (Cal OES)、住宅社區發展部 California Department of Housing and Community Development (HCD)、社會福利部 California Department of Social Services (CDSS)、公共衛生部 California Department of Public Health (CDPH)；聯邦政府包括：聯邦緊急事務管理署 Federal Emergency Management Agency (FEMA)、美國工兵團 U.S. Army Corps of Engineers (USACE)、農業部 U.S. Department of Agriculture (USDA)、內政部 U.S. Department of Interior (DOI)墾務局 Bureau of Reclamation (USBR)。對象分為：州、城市、郡、農夫、漁夫、護理之家、公園、學校、民營企業、民營非營利組織...等。

2014 Drought Assistance Programs

<i>The agencies below may have programs or resources available for:</i>	State	Cities	Counties	Farmers	Fisherman	Individuals	Farm Laborers	Nurses	Police	Private Businesses	Private Non-Profit	Refugee	Ranchers	Schools
California Department of Social Services (CDSS) Emergency Food Assistance Program (EFAP)						💧	💧				💧			
California Department of Water Resources (DWR) Prop 13 Agricultural Water Conservation Program Loan		💧	💧											
California Department of Water Resources (DWR) Prop 204 Sacramento Valley Water Management		💧	💧								💧			
California Department of Water Resources (DWR) Prop 81 California Safe Drinking Water Bond Law of 1988		💧	💧							💧	💧			💧
California Department of Water Resources (DWR) Prop 84 Integrated Regional Water Management		💧	💧								💧			
California Employment Development Department (EDD) Job Services				💧	💧	💧	💧							💧
California Employment Development Department (EDD) Unemployment Insurance (UI)						💧	💧							

Federal Emergency Management Agency (FEMA) Individual Assistance (IA) Crisis Counseling Programs (CCP)				💧	💧	💧	💧						💧
Federal Emergency Management Agency (FEMA) Individual Assistance (IA) Disaster Legal Services (DLS)				💧	💧	💧	💧						💧
Federal Emergency Management Agency (FEMA) Public Assistance (PA)		💧	💧	💧	💧	💧	💧				💧		💧
U.S. Army Corps of Engineers (USACE) PL 84-99		💧	💧										

圖 12. 加州乾旱各單位協助計畫與對象(California DROUGHT)^[10]

(四) 乾旱新興技術-避免水分蒸發

2015 年 4 月起發布加州史上第一個限水令，用水減少 25% 供給，8 月為了避免水分蒸發，加州政府在洛杉磯水庫裡倒下 9600 萬顆「遮光球」(Shade Balls) 計畫(圖 13)，當局公布今年 10 月用水量為 22.2%，首次未達規定，由於當月遭遇 25 年來最嚴重的熱浪。



圖 13. 洛杉磯市市長埃里克 Garcetti 隨著工人釋放遮光球到洛杉磯水庫(Los Angeles Department of Power and Water)^[11]

五、 加州乾旱衝擊與引發議題

乾旱期間，植物明顯枯黃，河流水位減少，湖泊和水庫水位下降，

以上幾個現象都是肉眼立即可以看見的乾旱現象，而本文蒐整了美國乾旱造成的後續衝擊影響。

(一) 空氣汙染持續

「今日美國」(USA Today) 報導指出，由於持續乾旱降雨不足，空氣中微粒會停留在接近地面處，被人們吸進肺裡，導致肺部出現感染現象或氣喘病發作。缺乏水氣造成更加炎熱，臭氧含量增高，廢氣也會形成，空氣品質因此下降。

(二) 野火事件頻繁

溫度上升造成森林大火頻繁、空氣品質惡化，引發呼吸系統問題。而引發的野火事件，在 2014 年 1 月 1 日至 10 月 3 日野火發生數約 3885 件(表 2)，而 2015 年同一期間盡發生 5635 件，比近五年平均多出 1.4 倍之多，2015 年因野火燒毀的土地面積約有 305,958 英畝。

表 2. 加州森林野火統計(Drought Impact Reporter)^[12]

時間	野火發生數	英畝(公畝)
2014 年 1/1-10/3	3,885	190,246(7699255.62)
2015 年 1/1-10/3	5,635	305,958(12382120.26)
五年平均	3,967	107,452(4348582.44)

(三) 農作物產量下降

農作物(玉米、小麥和牧草等)由於乾旱產量下降供給短缺因此價格上升(圖 14)，而畜牧業飼料成本增加，間接導致肉品及乳製品價格上升，農作物保險因乾旱賠償創下歷史新高的賠償紀錄。

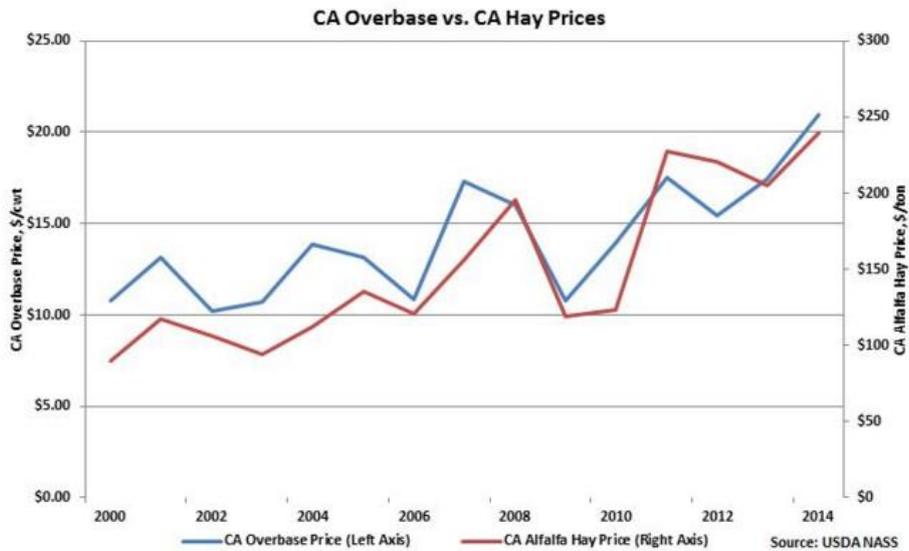


圖 14. 2000 年至 2014 年農作物價格(USDA NASS)^[13]

(四) 糧食價格上揚

由於美國是全球最大玉米出口國，而乾旱導致產量減少全球糧食價格大幅變動，玉米也不例外，玉米又是用來提煉生質燃料之原料，因此能源價格也上漲。

(五) 人口增加，水利設施新建阻撓

時代雜誌(Times):「擁有 3900 萬人口的加州，其人口比十年前增加一倍，但環保人士團體阻撓興建水庫，加州近五年來沒有興建水利設施」而加州水資源管理局統計，2001 年至 2010 年間，因浪費的用水佔加州總用水量的 47%，其中農業用水佔 43%，都市用水佔 10%，其浪費用水可支應 260 萬戶家庭用水。

(六)「遮光球」減少水資源蒸發?!

洛杉磯市政府為了喝止加州乾旱影響，傾倒 9600 萬黑色遮光球於洛杉磯水庫，以減緩水庫水蒸發。但美國各家新聞媒體深入探討，包含：遮光球的效益問題，估計遮光球的遮光效用可以減少一年 3 億加侖用水，但 3 億加侖價值 200 萬美金，而 9600 萬顆的遮光球費用約 34.5 億美元；另外，遮光球為塑料材質，長期暴露陽光底下，將會釋放出化學物質影響水源。

結論

乾旱雖然不像颶風、龍捲風及山洪爆發來得快去得快，但造成後續的衝擊影響很大，而美國每年都發生乾旱，乾旱在美國氣象災害上付出昂貴的損失。因應極端氣候可能造成的豐水期間雨量更多、枯水期雨量更少情境，強化枯旱預警指標，水資源調配機制，及早因應水資源不足之調配，減緩乾旱情況持續惡化。

附件一：美國乾旱概述

在 2012 年美國乾旱發生時，紐約時報(New York Times)將美國乾旱情況展示，自 1896 年至 2012 年期間，乾旱最嚴重時期為 1934 年，乾旱涵蓋面積最廣泛，而從圖 15 更顯示美國每年幾乎發生乾旱，可說美國乾旱發生頻率高。

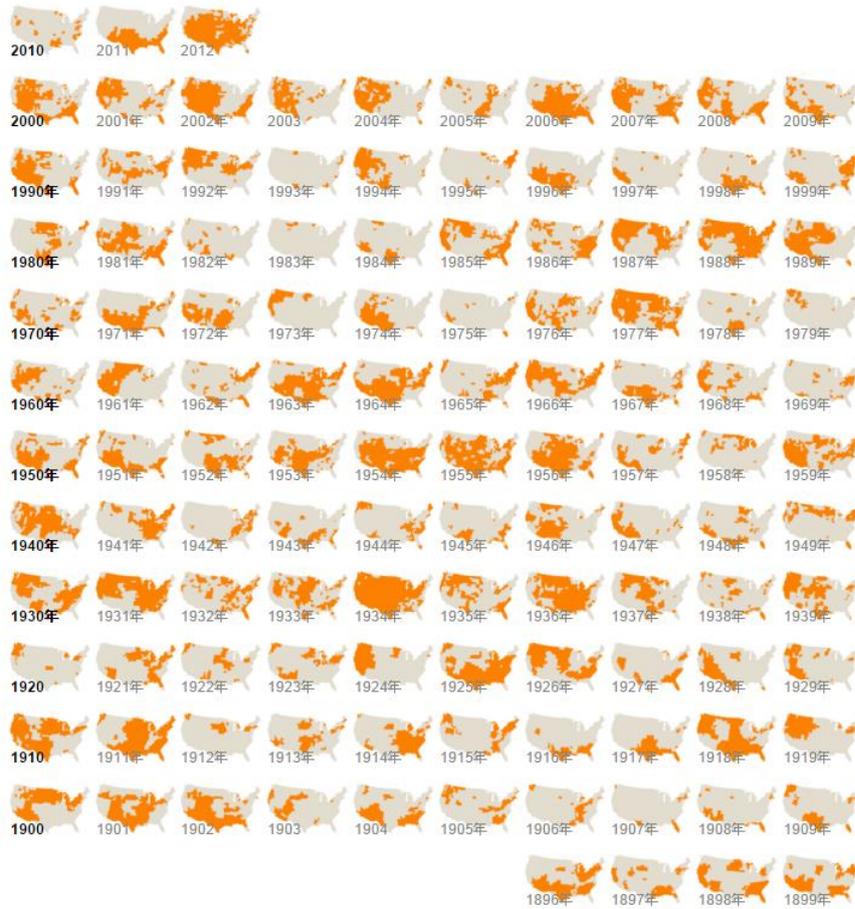


圖 15. 1896 年至 2012 年美國乾旱分布圖(New York Times)^[14]

從 2012 年乾旱以來至今美國乾旱並無中斷，雖然部分地區乾旱情況因降雨而有所趨緩，或部分地區在過去四年當中反覆發生乾旱，但仍有地區持續惡化下去。圖 16 分別為近四年的溼度分布圖，紅色系代表乾燥，當顏色越深紅表示越乾燥，而藍色系反之相較潮濕，2012 年除了西北部及部分中部地區呈現潮濕，其餘地區呈現乾燥階段，特別是德州；2013 與 2014 中部與東部地區乾燥轉為較潮溼，但西部地區乾燥情況更加劇烈到達濕度 2 等級，至今 2015 年亦是如此，因此本文針對美國加州乾旱深入探討。就連美國境內最大人工水庫-胡佛

水壩(Hoover DAM)，也因長期乾旱關係，水位持續下降，圖 17 是 2013 年與 2014 年水庫空照圖，水庫中央的土地明顯變大，而水庫歷線由 2013 年約 1105 英尺至 2014 年 1080 英尺，在一年之中下降 25 英尺(相當 7 公尺)(圖 18)。

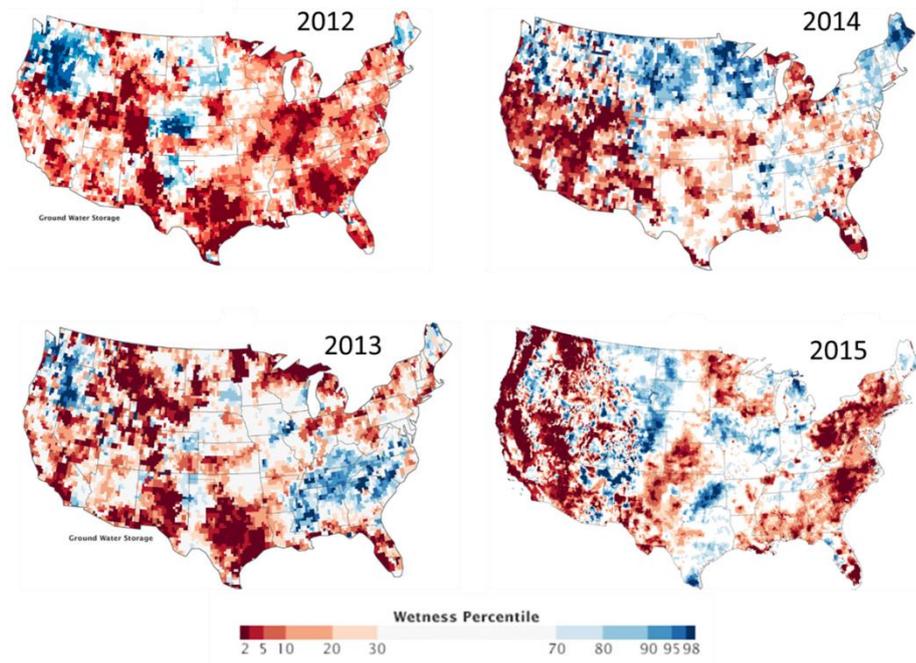


圖 16. 美國 2012(左上)2013 (左下)2014 (右上)2015 (右下)濕度分布 (NASA)^[15]

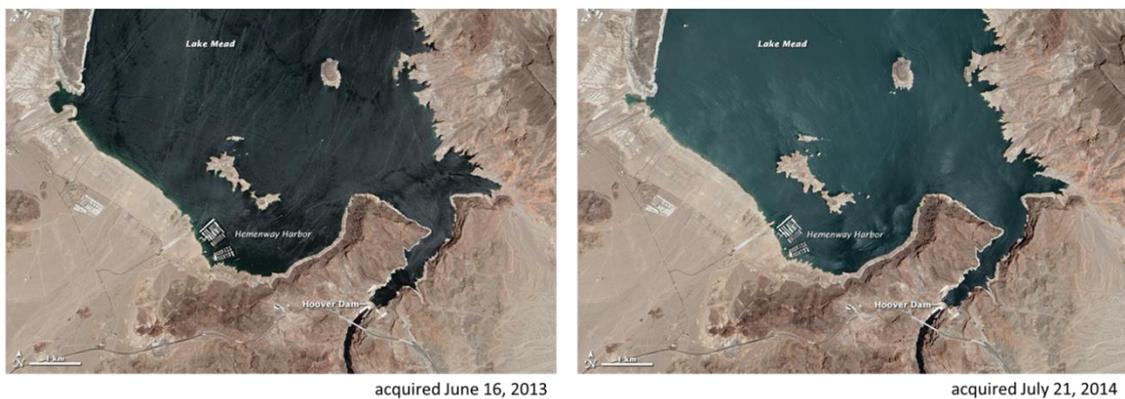


圖 17. 美國境內最大水庫胡佛水壩(Hoover DAM)2013 年和 2014 年水

庫空照圖^[16]

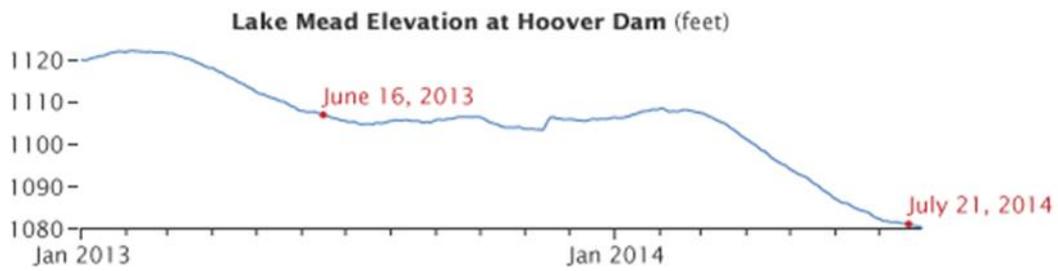
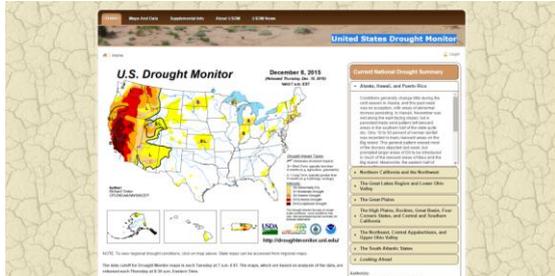
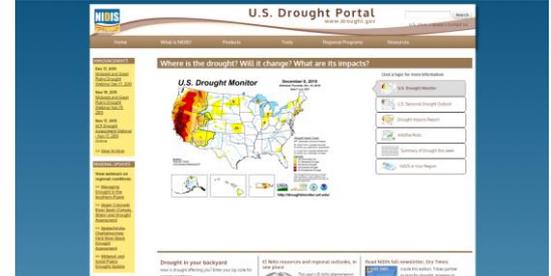
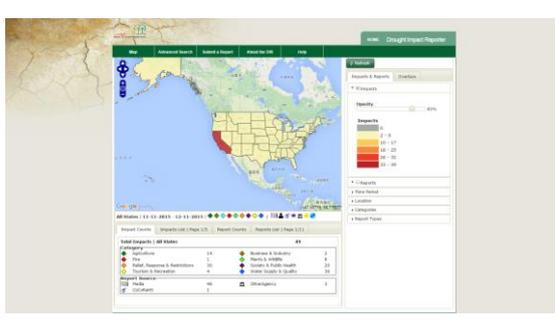
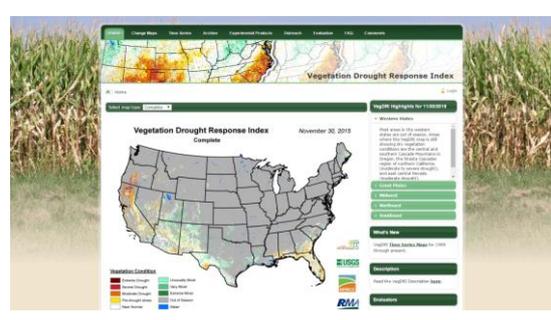


圖 18. 美國境內最大水庫胡佛水庫 2013 年 1 年至 2014 年 7 月水庫歷線^[16]

附件二:美國乾旱相關網頁

美國乾旱相關監控和情資說明，皆公開於網頁上(表 3)，美國乾旱監測(United States Drought Monitor)^[3]、美國乾旱網(U.S. Drought Portal)^[18]、乾旱衝擊記者(Drought Impact Reporter)^[12]、植生乾旱衝擊指數網(Vegetation Drought Response Index)^[18]、美國地質調查所水資源監控(USGS Water Watch)^[19]以及 USGS Science for a changing world^[20]等網頁，將美國乾旱甚至部分網頁涉及全世界乾旱議題，都呈現在網頁上，有利於乾旱相關資訊傳達。

表 3. 美國乾旱相關網頁展示

<p style="text-align: center;">United States Drought Monitor</p> 	<p style="text-align: center;">U.S. Drought Portal</p> 
<p style="text-align: center;">Drought Impact Reporter</p> 	<p style="text-align: center;">USGS Water Watch</p> 
<p style="text-align: center;">USGS Science for a changing world</p> 	<p style="text-align: center;">Vegetation Drought Response Index</p> 

參考文獻

1. National Centers for Environmental Information, NCEI
<https://www.ncei.noaa.gov/>
2. <http://www.latimes.com/science/la-me-g-california-drought-map-htmlstory.html>
3. U.S. Drought Monitor
<http://droughtmonitor.unl.edu/>
4. <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=86114>
5. <http://cdec.water.ca.gov/cdecapp/resapp/resDetailOrig.action?resid=SHA>
6. American Meteorological Society.

- <https://www2.ametsoc.org/ams/>
7. WeatherWest.com
<http://www.weatherwest.com/>
 8. <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=85632>
 9. San Joaquin River Water Authority Exchange Contractors
<http://www.sjrecwa.net/>
 10. California DROUGHT
<http://ca.gov/drought/#>
 11. Los Angeles Department of Power and Water
<https://www.ladwp.com/>
 12. Drought Impact Reporter
<http://droughtreporter.unl.edu/map/>
 13. USDA NASS
<http://www.nass.usda.gov/>
 14. New York Times
<http://www.nytimes.com/>
 15. NASA
<https://www.nasa.gov/>
 16. <http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=84105>
 17. U.S. Drought Portal
<http://www.drought.gov/drought/>
 18. Vegetation Drought Response Index
<http://vegdiri.unl.edu/>
 19. USGS Water Watch
<http://waterwatch.usgs.gov/>
 20. USGS Science for a changing world
<http://www.usgs.gov/>
 21. Stanford News
<http://news.stanford.edu/>