특집

01

IPCC AR6에서 전망한 극한가뭄 전망과 전세계 메가가뭄으로 인한 위협

이주헌
중부대학교
토목공학과 교수
leejh@joongbu.ac.kr

박상혁
중부대학교
토목공학과 석사과정
ghkfvpdrnls@naver.com

김영준
중부대학교
가뭄연구센터 연구원
kimyj9376@gmail.com

박서연
중부대학교
토목공학과 연구교수
sypark276@gmail.com

01 서론

가뭄은 복잡하고 광역적인 기후적 특성으로 인하여 미리 준비하고 효율적으로 대응하기 가장 어려운 기후 위험 요소 중 하나로서, 명확하게 정량화될 수 있는 다른 자연재해와 달리 가뭄의 시작, 지속 기간, 심도 등과 같은 주요 특징을 쉽게 정량화하기 어렵다. 가뭄에 의한 영향은 종종 간접적이고 비구조적이며 넓은 지역에 걸쳐서 발생하게 되므로 농업, 환경, 경제, 에너지, 관광, 건강 등 사회전반의 다양한 분야에서 심각한 수준의 피해가 발생하게 된다(Dai, 2011; Spinoni, J., et al., 2019).

우리나라의 경우, 2022년에 시작하여 2023년 봄에 최고 심도를 보였던 가뭄으로 인하여, 2022년 예년대비 70.4%, 전년대비 75.4% 수준의 강수량으로 1~7월 23개 시·군에서 제한급수 및 운반급수 피해인구가 19,089명으로 발표되었으며, 전국 다목적댐의 평균 저수율은 42.5%를 기록하여 전년 대비 약 12% 낮은 수치를 나타내었다(Kim et al., 2023).

가뭄은 전지구적으로도 큰 영향을 끼치는 자연재해로 미국의 경우 2021년 캘리포니아 주 전체 인구의 95%에 해당하는 3,730만여 명이 가뭄으로 인한 직, 간접적 피해을 입었으며, 중국의 경우 2013년에

SPECIAL ISSUE

600만 명의 식수공급 피해와 9,400억원의 재산피해가 발생하였다. 이와 같은 극심한 가뭄이 수년이상 지속될 경우 가뭄에 의한 피해는 더욱 대형화 되므로 평소에 가뭄에 대한 준비가 충분히 되어 있어야 한다.

02 국내·외 메가가뭄 사례

메가 가뭄에 대한 엄격한 과학적인 정의는 없으나(Pawley, T. A. (2021), 많은 연구에서 10년 이상 최대 수 세기 동안 지속되는 매우 길고 광범위한 가뭄을 일컫는다(Ning, L., et al., 2018; Carter, V. A., et al., 2018; Ojeda, MGV., et al., 2021). 그림 1은 2022년 기준, 전 세계의 현재 진행중인 또는 역사적 가뭄을 표시한 것으로 미국 캘리포니아, 칠레, 중앙아프리카 등 현재까지도 가뭄으로 인해 고통받고 있다.

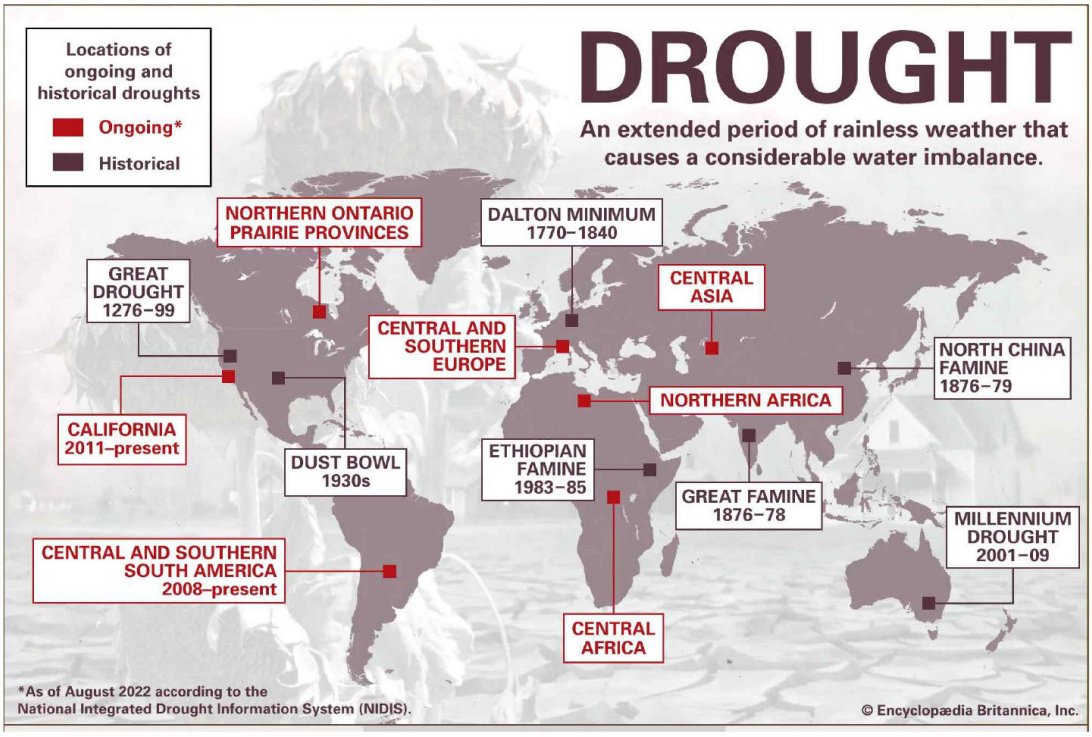


그림 1. 전 세계에서 발생했던 역사적 가뭄의 기간과 국가(Kenny, 2022)

2.1 미국 캘리포니아 가뭄

2000년부터 2021년까지 22년간 미국 서부 지역은 측정 가능한 범위인 서기 800년 이후 1200년 만에 가장 극심한 메가가뭄을 겪었다. 2021년 기록적인 폭우가 일부 지역을 강타한 후에도 극심한 가뭄을 겪었으며, 북미에서 첫 번째와 두 번째로 큰 저수지인 미드와 포웰 호수는 2021년 여름에 역사상 최저 수위를 기록했다. 전체적으로

농업에 대한 가뭄으로 인한 경제적 비용은 2022년 13억 달러로, 총 경제적 비용인 17억 달러의 약 76%에 해당하는 비용이 추산될 만큼 미국의 역사에서 가장 심각한 가뭄을 겪었으며, 일부 가뭄연구 학자들은 금세기에 나타난 가장 심각한 메가가뭄이라는 정의를 내리기도 했다(Josue Medellin-Azuara et al., 2022).

2.2 호주 밀레니엄 가뭄

1997년부터 2009년 동안 호주는 밀레니엄 가뭄이라고 명명된 전례 없는 건조한 환경이 지속되었으며, 빅토리아주 전역의 물공급 시스템 설계기준을 훨씬 벗어난 건조현상을 초래했다. 2006-07년 여름까지 많은 지역이 심각한 물 부족에 직면했으며, 유역간 물이동을 위한 파이프라인 등의 건설을 통해 지역사회 물 공급 및 산업을 유지하기 위해 노력하였다(Goverment of South Australia). 밀레니엄 가뭄 시기 동안 호주의 농업 총생산성이 약 18% 감소했으며, 이는 호주의 농업 생산성 증가가 장기적으로 둔화되는데 크게 기여했다(Yu Sheng et al., 2019). 또한, 산불과 같은 환경적 영향 뿐만 아니라 주요 도시에서 용수사용 제한을 시행하고, 전기료를 인상하는 등 경제적 조치도 동시에 이루어진 것으로 나타났다(Albert Van Dijk et al., 2013).

2.3 칠레 가뭄

1,000만 명 이상의 인구가 거주하는 칠레 중부는 2010년 이후 평균 강우량 부족이 예년 평균의 20-40%에 달하는 건조한 해가 지속되었으며(Rene D. Garreaud et al., 2019), 13년 이상 지속된 대규모 가뭄으로 인해 강수량이 크게 감소하였다(C.Herrera et al. 2023). 2021년 칠레 중부의 기온은 1981~2010년 설정된 정상 범위의 온도보다 1~2℃ 높았으며, 이 수치는 대륙의 평균 기온 상승보다 0.36°C 더 높은 것으로 분석되었다(Xu, N. 2013).

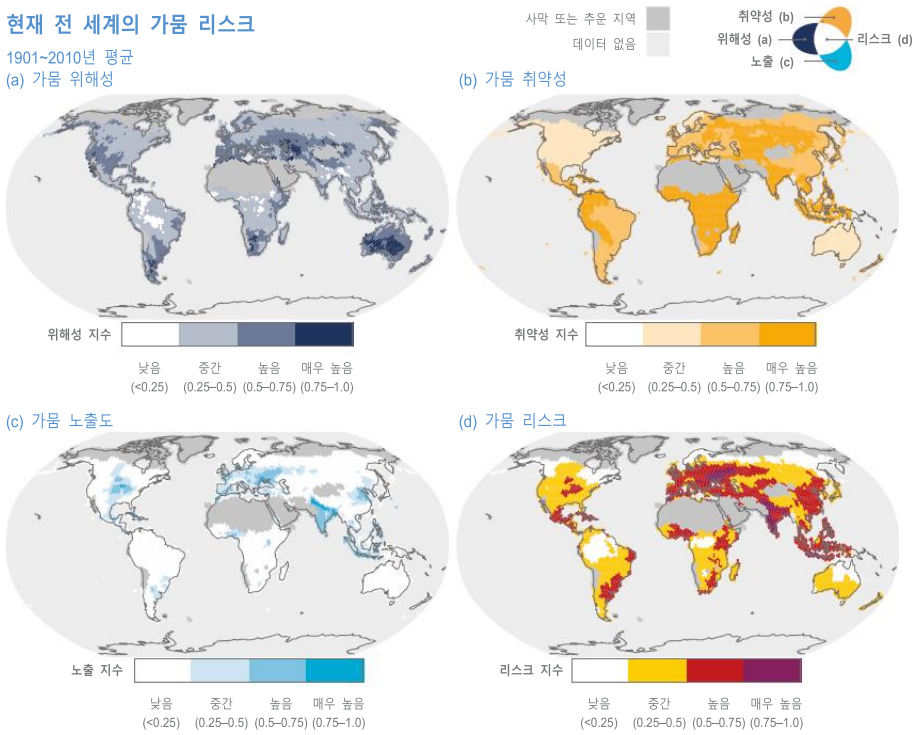
03 가뭄에서 관측된 변화

IPCC의 AR6 Climate Change 2022: Impact, Adaptation and Vulnerability 보고서에서는 물분야에서 지난 100년간 발생한 홍수, 가뭄 및 지표수, 지하수, 수질의 변화를 분석한 결과를 제시하였다. 1901년부터 2010년까지의 전지구강수기후센터(Global Precipitation Climatology Centre, GPCC)의 강수데이터를 이용하여 계산된 가뭄위해성지수(Drought Hazard Index)를 기반으로 가뭄 취약성을 산출하였다. 가뭄 취약성(Vulnerability)은 국제전략기구(UNISDR, 2004)이 제안한 산술복합모델을 활용하여 사회, 경제, 인프라 등의 다양한 요소를 종합적으로 고려한 것이다. 지역별 가뭄 노출도(Exposure)는 자료포락분석(Data

Envelopment Analysis, DEA) 모델을 활용하여 측정되었고, 가뭄리스크(Risk)는 위해성, 노출도, 취약성을 종합하여 0 에서 1 사이의 점수로 표현하였다(Carrão et al., 2016). 인구밀도가 높고, 작물과 가축을 많이 기르는 지역인 남아시아와 중앙아시아, 남미 남동부, 중부유럽과 미국 남동부와 같은 지역에서 가뭄리스크가 상대적으로 높게 나타났다.

경제적 측면에서 가뭄의 취약성을 살펴보면 가뭄에 따른 취약성이 1980년대 이후로 감소했지만, 여전히 2007년부터 2016년까지 저소득 국가에서는 고소득 국가에 비해 2배 정도 높은 수준을 보이고 있다(Formetta and Feyen, 2019). AR6 WGII(Douville et al., 2021; Seneviratne et al., 2021)에 따르면 증발요구량의 증가로 인한 기상학적 가뭄은 증가하며, 농업 및 생태학적 가뭄은 더 분명한 증가 추세를 나타내었다. 특히, 지중해와 북미 서부 등에서는 농업 및 생태학적 가뭄의 빈도와 심도가 인위적 온난화에 의해 증가한 것으로 평가되었다. 그러나 일부 지역에서는 인위적 기후변화에 대한 원인이 낮은 신뢰도로 나타나기도 했다.

우리나라는 안전한 물공급시스템 수준으로 인하여 취약성은 낮은 것으로 평가되었지만,인하여 취약성은 낮은 것으로 평가되었지만, 위해성과 노출도에서



출처 : IPCC AR6 WG2 보고서 (Chapter 4. Water)

그림 2. 1901~2010간 관측된 자료기반의 전세계의 가뭄리스크 평가 결과

중간 정도로 평가됨에 따라서 중간수준(0.25~0.5)의 가뭄위험도를 갖는 것으로 평가되었다. 자연적 가뭄발생의 위해성으로는 다소 높게 평가되었지만, 국가의 물공급 인프라 및 경제적 수준이 전체적인 가뭄리스크를 낮출 수 있다는 평가결과라고 이해할 수 있다.

04 가뭄에서 전망되는 변화

IPCC AR6 WGI(Douville et al., 2021)에서는 지중해, 남미 남서부, 북미 서부에서의 가뭄발생 빈도와 가뭄의 심도가 높은 신뢰도에서 커지는 것으로 전망하고 있으며, 미래의 지구 건조화는 지난 천년 동안 나타난 변화의 규모를 훨씬 능가할 것이라고 결론지었다.

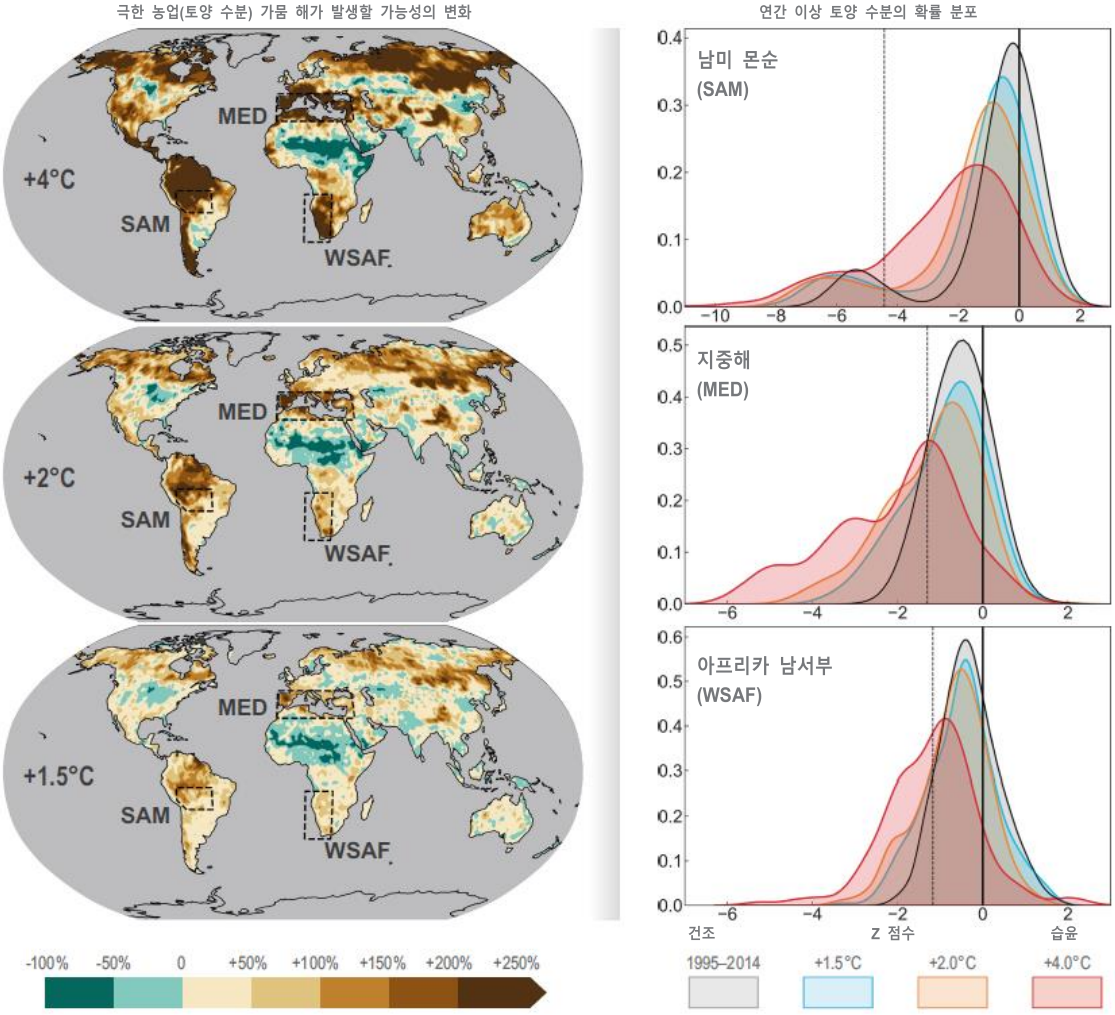
가뭄의 발생빈도를 전망함에 있어서 기상학적 가뭄을 일반적으로 생각하겠지만 Cook et al. (2020a)의 연구는 CMIP6 앙상블을 기반으로한 연구에서 토양수분 및 하천 유출의 감소에 의한 건조가 강수부족보다 더욱 강력하고 공간적으로도 더 광범위하고 더 심각하기 때문에 기상학적 가뭄보다는 농업적 가뭄의 빈도가 더 넓은 지역에서 늘어나고 있는 상황이다. 전체 GCM의 앙상블을 활용하여 분석한 결과에 의하면, 1.5°C, 2°C, 4.0°C 세계 온난화 수준(GWL)에서의 극한가뭄 발생 가능성을 전망하였고, 1.5°C의 지구온난화 시나리오에서는 남미 북부, 지중해, 중국 서부, 북미와 유라시아 고위도 지역에서 농업적 가뭄이 100%로 증가할 것으로 전망되고 있으며, 2°C의 경우 150~200%, 4°C에서는 이러한 영향을 받는 지역에서 200% 이상 증가할 것으로 전망되었다. 북미 남서부, 아프리카 남서부, 아시아 남부, 호주 역시 4°C 지구 온난화시 200%이상 상승할 것으로 전망되었다. 한편으로는 극심한 가뭄의 발생 가능성은 북미 중부, 아프리카 동북부(Horn of Africa), 인도아대륙 동부, 아시아 서부 및 동부 일부 지역에서는 감소할 것으로 예상되었다.

Cook et al. (2020a)의 또 다른 분석으로서, 지역별로는 지중해(MED), 남미몬순(SAM), 아프리카 남서부(WSAF)의 토양수분의 확률분포함수 변화를 전망하였다(그림 3 오른쪽 그래프). 수직선은 기준선으로서 1995~2014년의 50번째 백분위에 해당하는 값이고, 수직 점선은 10번째 백분위수(극한가뭄에 해당하는 위치)이다.

CMIP5에 비하여 CMIP6 앙상블은 아마존 유역에서 더욱 일관된 건조를 전망하고 있으며 시베리아에서 더욱 광범위한 토양수분감소를 전망하고, 북아프리카서단과 호주 남서부에서 심각한 수준의 토양수분 감소를 전망하고 있다. 결국 토양수분의 감소는 이렇게 전망된 지역에서 매우 극심한 농업적 가뭄으로 이어질 확률이 높아지게 된다. 하지만, 이러한 가뭄의 전망은 계절별로 다르게 나타나고 있으며 연평균변화와는 상당히 다른 양상으로 전망될 수도 있다.

예를 들어, 아시아 북서부에서는 수문학적 가뭄이 가을과 겨울에 50~100% 감소하고 봄과 여름에는 250%까지 증가할 것으로 전망되었다. 그러나 가뭄 전망은 생물리학적 프로세스와 관련된 불확실성으로 인해 불확실성을 가지며, 광역적 기후변화의 불확실성은 전체적으로 커지고 있다. 또한, CO2의 증산에 대한 반응에도 상당한 불확실성이 있으며, CO2의 생리적 효과를 고려하면 농업적, 생태학적, 수문학적 가뭄의 증가가 상대적으로 감소하는 경향을 보인다(Milly and Dunne, 2016; Yang et al., 2020).

IPCC AR6 WG2 보고서 에서는 가뭄으로 인하여 영향을 받는 육지면적의 변화와 인구의 변화도 전망하였으며, 가뭄에 노출되는 전 세계 인구의 비율은 기후변화에 따라 늘어날 것으로 전망되고 있다.



출처 : IPCC AR6 WG2 보고서 (Chapter 4. Water)

그림 3. 극한 농업적 가뭄 해가 발생할 가능성의 변화, 연간 이상 토양 수분의 확률 분포

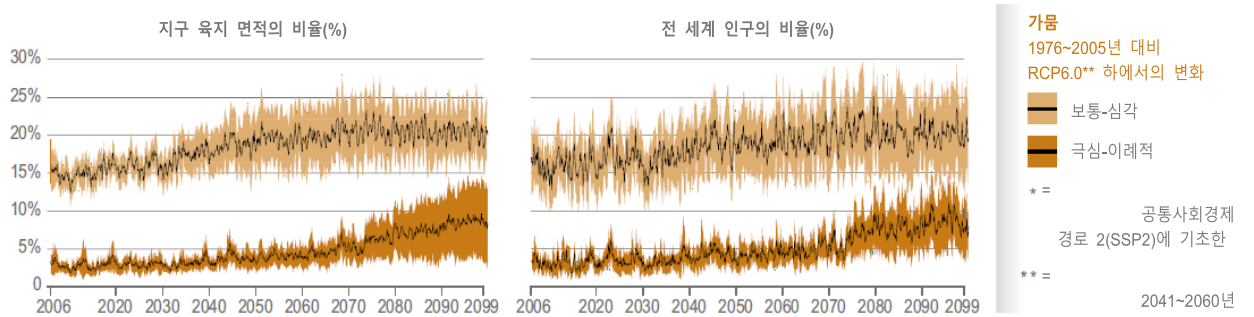


그림 4. 가뭄 지역 및 영향을 받는 인구변화의 전망

RCP 6.0하에서 21세기 후반까지 이례적 가뭄에 처하는 지구 육지면적은 3%에서 7%로 늘어날 것으로 전망되며, 이 수준의 가뭄에 처하는 세계인구는 3%에서 8%로 증가하는 것으로 전망하고 있다.

05 맺음말

몇 달간 지속되는 가뭄 또는 1-2년 정도 지속되는 가뭄은 높은 수준의 물공급 인프라가 구축되어 있고, 가뭄을 상시 모니터링하며, 상시 가뭄대책을 만들어 놓은 국가는 어느 정도 대응이 가능하다. 우리나라도 오랜 기간의 가뭄경험과 기술적, 제도적 투자를 통하여 이 정도에 준하는 가뭄대응이 충분한 국가임이 분명하다. 하지만, 5년이상 10년 가까이 지속되는 메가가뭄에는 과연 대응이 가능한지 점검이 필요하다.

메가가뭄이 발생한 지역은 절대적인 물 부족으로 인해 농작물 수확량이 급감하고, 이로 인해 생산 기반이 약화됨으로써 산업 전 분야에서 막대한 손실을 겪게 되며, 가뭄이 발생하지 않은 지역에서조차도 농산물 및 생필품 가격 상승이 발생하여 국민의 생활에 직접 및 간접적으로 피해를 초래한다.

이로 인해 국가 전반적으로 농업과 산업 부문의 불안정성이 증가하고 국민들은 물가 상승, 용수 부족 등의 영향을 겪게 된다. 따라서 메가가뭄은 지역적으로 한정된 물문제 뿐만 아니라 국가의 안보 및 안정성에 영향을 미치는 문제로써 심각성을 지닌다. 따라서 국가는 10년의 가뭄에 대응할 수 있는 물공급 및 구조적 혹은 비구조적 가뭄관리 방안을 준비해야 하며, 가뭄시에도 보다 능동적으로 대처할 수 있는 국민의식의 전환과 사회구조를 만들어야 한다.

참고문헌

김윤성, 정민규, 김태웅, 정승명, & 권현한. (2023). 2022 년 남부지역 수문학적 가뭄위험도 평가: 수문학적 이변량 가뭄 지역빈도해석 중심으로. 한국수자원학회 논문집, 56(2), 151-163.

Carrão, H., Naumann, G., & Barbosa, P. (2016). Mapping global patterns of drought risk: An empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability. Global Environmental Change, 39, 108-124.

Carter, V. A., Shinker, J. J., & Preece, J. (2018). Drought and vegetation change in the central Rocky Mountains and western Great Plains: potential climatic mechanisms associated with megadrought conditions at 4200 cal yr BP. Climate of the Past, 14(8), 1195-1212.

Cook et al. (2020): Cook, B., et al., 2020a: Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. Earth's Future, 8(6), e2019EF001461. DOI: https://doi.org/10.1029/2019EF001461

Dai, A., Zhao, T., & Chen, J. (2018). Climate change and drought: a precipitation and evaporation perspective. Current Climate Change Reports, 4, 301-312.

Formetta, G., & Feyen, L. (2019). Empirical evidence of declining global vulnerability to climate-related hazards. Global Environmental Change, 57, 101920.

Hagenlocher, M., et al., 2019: Drought vulnerability and risk assessments: state of the art, persistent gaps, and research agenda. Environ. Res. Lett., 14(8), 83002.

International Strategy for Disaster Reduction. (2004). Living with risk: A global review of disaster reduction initiatives.

Jurgilevich, A., A. Räsänen, F. Groundstroem and S. Juhola, 2017: A systematic review of dynamics in climate risk and vulnerability assessments. Environ. Res. Lett., 12(1), 13002.

Milly, P. C., & Dunne, K. A. (2016). Potential evapotranspiration and continental drying. Nature Climate Change, 6(10), 946-949.

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... & Zhou, B. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2.

Medellín-Azuara, J., Escriva-Bou, A., Rodríguez-Flores, J. M., Cole, S. A., Abatzoglou, J. T., Viers, J. H., ... & Bernacchi, L. (2022). Economic Impacts of the 2020–22 Drought on California Agriculture.

Ning, L., Liu, J., Wang, B., Chen, K., Yan, M., Jin, C., & Wang, Q. (2018). Variability and mechanisms of megadroughts over eastern China during the last millennium: A model study. Atmosphere, 10(1), 7.

Ojeda, M. G. V., Gámiz-Fortis, S. R., Romero-Jiménez, E., Rosa-Cánovas, J. J., Yeste, P., Castro-Díez, Y., & Esteban-Parra, M. J. (2021). Projected changes in the Iberian Peninsula drought characteristics. Science of The Total Environment, 757, 143702.

Pawley, T. A. (2021). Drier Futures: Water Conservation and Drought Resilience

Planning for Museums.
Parmesan, C., Morecroft, M. D., & Trisurat, Y. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability (Doctoral dissertation, GIEC).
Spinoni, J., Barbosa, P., De Jager, A., McCormick, N., Naumann, G., Vogt, J. V., ... & Mazzeschi, M. (2019). A new global database of meteorological drought events from 1951 to 2016. Journal of Hydrology: Regional Studies, 22, 100593.
Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., ... & Zhou, B. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate (Chapter 11).
Trenberth, K., Overpeck, J., and Solomon, S. (2004). "Exploring drought and its implications for the future." Eos, Transactions American Geophysical Union, Vol. 85, No. 3, p. 27.
Yang, Y., Liu, D. L., Anwar, M. R., O'Leary, G., Macadam, I., & Yang, Y. (2016). Water use efficiency and crop water balance of rainfed wheat in a semi-arid environment: sensitivity of future changes to projected climate changes and soil type. Theoretical and applied climatology, 123, 565-579.