Atmosphere-Korea. Korean Meteorological Society
Vol. 35, No. 1 (2025) pp. 13-27
https://doi.org/10.14191/Atmos.2025.35.1.013
pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

연 구 논 문
(Article)

국내 폭염-가뭄 복합 재해 발생 증가에 따른 기후 리스크 평가의 필요성

김용준[1] · 예상욱[1]* · 최용상[2] · 손석우[3,4] · 오석근[3] · 양영민[5] · 김준[6]
[1]한양대학교 ERICA 해양융합공학과, [2]이화여자대학교 기후·에너지시스템공학과,
[3]서울대학교 지구환경과학부, [4]서울대학교 대학원 협동과정 인공지능 전공,
[5]전북대학교 환경공학과, [6]연세대학교 대기과학과

(접수일: 2024년 10월 2일, 수정일: 2024년 10월 22일, 게재확정일: 2024년 10월 30일)

The Need for Climate Risk Assessment in Response to the Increasing Occurrence of Compound Drought-Heatwave Events in Republic of Korea

Yong-Jun Kim[1], Sang-Wook Yeh[1]*, Yong-Sang Choi[2], Seok-Woo Son[3,4], Seok-Geun Oh[3], Young-Min Yang[5], and Jhoon Kim[6]

[1]*Department of Marine Science and Convergence Engineering, Hanyang University ERICA, Ansan, Korea*
[2]*Department of Climate and Energy Systems Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea*
[3]*School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea*
[4]*Interdisciplinary Program of Artificial Intelligence, Seoul National University, Seoul, Korea*
[5]*Department of Environmental Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea*
[6]*Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea*

(Manuscript received 2 October 2024; revised 22 October 2024; accepted 30 October 2024)

Abstract In recent years, the frequency of compound drought-heatwave events (CDHEs) has increased significantly. Previous studies have shown that CDHEs have a greater impact on society and ecosystems than individual hazards. Therefore, it is necessary to assess climate risk of CDHEs. However, few studies have investigated the current status of CDHEs in Republic of Korea and conducted related risk assessments. In this study, we used the MYRIAD-Hazard Event Sets Algorithm (MYRIAD-HESA), which generates multi-hazard pairs using daily heatwave and drought data, to analyze the occurrence of CDHEs during the May-October period from 1979 to 2023. The results were then used to assess climate risks in the health and agricultural sectors across the country's 17 administrative districts. The analysis revealed an increasing trend in the number of CDHEs in recent years, with an average duration of about 11.4 days. The districts most affected by CDHEs were Seoul, Gyeonggi-do, Gyeongsang-do, and Jeollanam-do, which experienced a higher hazard intensity than a single heatwave or drought. The risk assessment identified Gyeonggi-do as having a 'very high' risk of CDHEs in the health sector, while Jeollanam-do and Gyeongsangbuk-do, both major rice-producing regions, had the same risk in agricultural sector. In particular, when risk assessments focused only on individual hazards without considering CDHEs, the risk was found to be underestimated in Gyeongsangnam-do and Jeollanam-do, potentially leading to inadequate risk management. This highlights the importance of further research into the occurrence of compound hazards such as CDHEs, and underscores the need for climate risk assessments targeting these events.

*Corresponding Author: Sang-Wook Yeh, Department of Marine Science and Convergence Engineering, Hanyang University ERICA, Ansan 15588, Korea.
Phone: +82-031-400-4222, Fax: +82-31-436-8177
E-mail: swyeh@hanyang.ac.kr

© 2025 Korean Meteorological Society

Key words: Compound drought-heatwave events, Climate risk assessment, MYRIAD-HESA, Health, Agricultural

1. 서 론

최근 전 세계에서는 기후 위기로 폭염, 가뭄, 홍수 등의 극한 기상 현상이 빈번하게 발생하고 있으며, 이에 따라 사회·경제적 피해가 다수 발생하고 있다(Aghakouchak et al., 2020). 기상청이 발표한 '2023 이상기후보고서'에 따르면, 2023년 7월 미국 애리조나주 피닉스에서는 31일 연속 43°C 이상을 기록하며 최장 폭염 기록을 경신하였으며, 같은 해 10월 나이지리아 북동부 지역에서는 폭우로 인해 발생한 홍수로 275명이 사망하는 등의 큰 피해가 발생하였다. 우리나라도 2023년 연평균 기온이 13.7도를 기록하여 현대적인 기상관측이 시작된 1973년 이후 역대 1위 기록을 경신하였으며, 7월 집중 호우로 다수의 인명·재산 피해가 발생하는 등 극한 기상 발생으로 인한 피해가 지속적으로 나타나고 있다.

특히 다양한 요인(driver) 및 재해들이 동시에, 혹은 상호 영향으로 특정 시간 차를 두고 발생하는 복합재해(Zscheischler et al., 2018; Ridder et al., 2020) 현상이 많은 주목을 받고 있다. 이들은 개별 재해의 강도가 약하더라도 재해 간 상호작용을 통해 더 강력한 피해를 초래할 수 있는 특징이 있다(Rummukainen, 2012; Leonard et al., 2014). 또한, 직접적 피해뿐만 아니라 사회 및 경제 부문으로의 간접적 피해 역시 초래하는 경우가 잦아 단일 재해 대비 큰 리스크를 내포하고 있다. 실제로 지난 2010년 러시아에서 폭염, 가뭄, 산불이 동시에 발생하여 55,000명 이상이 사망하고, 약 17억 4천만 달러의 경제적 피해가 발생한 것이 대표적 사례 중 하나이다. 당시 약 7개월간 이어진 장기간의 가뭄으로 인해 강력한 폭염이 동반되었고, 고온 건조해진 대기로 인해 산불이 급속도로 확산되었다(Witte et al., 2011). 이때 산불로 인해 발생한 연기가 모스크바 등 대도시에 다량 유입되어 극심한 대기오염을 유발하였으며, 폭염 및 대기 오염으로 인한 사망자가 다수 발생하는 결과를 낳았다. 이에 더해, 가뭄으로 인한 작물 수확량 감소는 러시아 정부의 곡물 수출 금지로 이어졌고, 이는 세계 밀 가격에 지대한 영향을 미쳤다(Welton, 2011).

본 연구에서는 가장 대표적인 복합 재해인 폭염과 가뭄이 함께 발생하는 폭염-가뭄 복합 재해(compound drought-heatwave events, CDHEs) 현상에 주목하였다. 여러 선행 연구에 따르면 CDHEs 현상은 남미 아마존 지역, 아프리카 중·남부 지역, 중부 유럽, 동북아시아 지역 등에서 그 발생 빈도 및 강도의 증가를 보이고 있으며(Mukherjee and Mishra, 2021; Wang et al., 2021; Chiang et al., 2022; Hao et al., 2022; Seo and Ha, 2022), 발달 과정에서 폭염과 가뭄의 지속 기간을 증가시키는 양의 되먹임 현상인 지면-대기 상호작용이 주요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Zhang et al., 2020; Bastos et al., 2021; Benson and Dirmeyer, 2021; Seo and Ha, 2022). 또한, 미래 기후 시나리오별로 비교하여 인구, 국내총생산(gross domestic production, GDP) 및 농경지에 대한 CDHEs의 영향을 살펴본 Yin et al. (2023)에 따르면, 21세기 말에 이르러 CDHEs의 발생 증가로 작물 생산량 감소 및 경제 성장 저하가 뚜렷하게 나타날 것으로 전망되었다. 특히, 그 피해가 주로 개발도상국에서 발생할 것으로 전망되어 이에 대한 관심 및 연구가 필요하다.

CDHEs의 빈번한 발생과 함께 이에 대한 대응 및 관리 방법 중 하나로 기후 리스크 평가(climate risk assessment, CRA)에 대한 연구가 최근 주목받고 있다. 기후 리스크 평가는 극한 기상 현상이 초래할 수 있는 물리적 피해, 즉 기후 리스크를 지역별 혹은 부문별로 산출하는 것을 말한다. 기존에는 재해(hazard), 노출도(exposure), 취약성(vulnerability)의 세 가지 항목을 고려하는 방식이 널리 사용되었다(Zscheischler et al., 2018; Claassen et al., 2023; Zhang et al., 2023; Choi et al., 2024). 대표적 예시로 CDHEs의 발생 빈도, 국가별 인구수와 경작지 면적, 국가별 거버넌스 지표(governance indicator, GI)를 각각 재해, 노출, 취약성 항목으로 설정하여 사회·경제 부문의 기후 리스크 평가를 수행한 Tabari and Willems (2023)의 연구 사례가 있다. 그러나 이 방법은 특정 기후 재해에 대한 사회 및 경제적 대응력을 반영하지 못한다는 한계가 있었다. 이를 보완하기 위해, 최근 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 제6차 보고서에서는 대응 항목을 추가한 식(1)의 방식이 새롭게 제안되었다(IPCC, 2023). 여기서 재해, 노출도, 취약성 항목은 최종 기후 리스크 값에 비례하지만, 대응 항목은 반비례하며 모든 항목이 기후 리스크의 크기를 결정하는 데에 있어 중요한 요소로 작용한다는 특징이 있다.

$$\text{기후 리스크(climate risk)} = \text{재해(hazard)} \times \text{노출도(exposure)} \times \text{취약성(vulnerability)} \times \text{대응(response)} \quad (1)$$

현재 국내에서도 이 개념에 맞추어 기후 리스크 평가 연구가 이루어지고 있으나 우리나라 지자체 단위에서 폭염, 가뭄, 홍수 등의 단일 재해가 아닌 복합 재해의 발생 빈도 및 리스크 평가 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구는 대표적인 복합 재해 현상 중 하나인 CDHEs의 국내 발생 현황을 분석하여 이에 대한 연구 필요성을 고찰하고, 시범적으로 건강 및 농업 부문 대상 기후 리스크 평가를 진행하여 CDHEs와 같은 복합 재해를 대상으로 한 기후 리스크 평가 도입이 시급함을 강조하고자 한다.

2. 연구 방법

대다수의 기존 연구에서는 주로 표준강수지수(standardized precipitation index, SPI), 표준강수증발산지수(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI) 등의 월 단위 가뭄 자료를 활용하여 CDHEs를 산출하였다(Zhang et al., 2022; Wang et al., 2024). 하지만, 폭염으로 인해 유발될 수 있는 단기간의 가뭄인 돌발 가뭄(flash drought) 현상의 경우, 그 지속 기간이 약 5일에서 10일 정도로 짧기에(Mo and Lettenmaier, 2016; Lisonbee et al., 2022), 보다 정밀한 CDHEs 발생 경향을 파악하기 위해서는 일 단위 자료를 활용하는 것이 합리적이다. 본 연구에서는 일 단위 폭염 및 가뭄 자료를 활용하여, 우리나라를 대상으로 총 45년(1979~2023)의 기간 중 5월에서 10월 기간에 발생한 CDHEs를 산출하였다. 분석에는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis 5 (ERA5; Muñoz Sabater, 2019)에서 제공하는 $0.1^{o} \times 0.1^{o}$ 해상도의 시간별 지면 재분석 자료를 일 단위 자료로 변환하여 활용하였다. 일 단위 평균 지면 2 m 온도(T_{mean}) 자료의 경우, 시간별 온도 값을 각 격자마다 일평균하여 산출하였으며, 실제 증발산량(actual evapotranspiration, AET) 및 잠재 증발산량(potential evapotranspiration, PET) 자료의 경우 시간별 값을 격자마다 하루 동안 합산하여 일 단위 자료로 산출하였다. 또한, 기후 평년값은 1981~2010년 기간을 사용하였다.

2.1 일별 폭염 및 가뭄 자료

2.1.1 폭염 자료

폭염 자료의 경우 T_{mean} 자료를 활용하였으며, 백분위수(percentile) 개념을 적용하여 산출하였다(Zhang et al., 2011). 이때, Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)에서 권고하는 사항을 적용하여, 각 날짜의 앞뒤 각각 2일 기간의 T_{mean}도 함께 고려하였다. 예를 들어 1월 10일의 백분위수 값 산출 과정에는 기후 평년값 시기의 30년 치 1/8~1/12 자료, 총 150개의 값이 사용되었다. 이를 통해 각 일자 및 격자마다 기준 값을 계산하였으며, 폭염의 정의는 Tong et al. (2014)에서 사용한 방식을 참조하여 T_{mean}이 상위 90 백분위수 값 이상인 날이 3일 이상 연속되는 것으로 설정하였다(Table 1).

Table 1. Definition of heatwave and drought events.

Hazard	Definition
Heatwave	$T_{mean} \geq$ 90th percentile, at least 3 days
Drought	$DEDI \leq$ 10th percentile, at least 3 days

2.1.2 가뭄 자료

가뭄 자료 역시 폭염과 유사한 방법으로 산출하였다. 본 연구에서는 일 단위 가뭄 지수를 산출하기 위해 Zhang et al. (2023)에서 제안한 daily evapotranspiration deficit index (DEDI) 자료를 활용하였다. DEDI는 식(2)와 같이 각 격자마다 i 번째 날의 AET와 PET의 차이를 기반으로, 식(3)을 통해 기후 평년 기간에서의 일평균 값($D_{i,ave}$)과 그 표준편차($D_{i,std}$)를 활용하여 산출된다. 이 방식은 지표면에서의 물 공급과 대기의 최대 가능 증발산량을 함께 고려하기 때문에, 강수량 혹은 잠재 증발산량만을 고려하는 타 지표에 비해 지표면의 물 순환 과정을 더욱 상세하게 반영한다는 이점이 있다(Zhang et al., 2023).

$$D_i = AET_i - PET_i \tag{2}$$

$$DEDI_i = \frac{D_i - D_{i,ave}}{D_{i,std}} \tag{3}$$

이때, DEDI는 값이 작을수록 더욱 강한 가뭄을 의미하며, 본 연구에서는 ERA5에서 제공하는 AET, PET 자료를 활용하여 일 단위 DEDI 자료를 산출하였다. 이로부터, 가뭄의 정의는 DEDI 값이 하위 10 백분위수 이하인 날이 3일 이상 연속인 경우로 설정하였다(Table 1).

2.2 폭염-가뭄 복합 재해 산출

일 단위 폭염 및 가뭄 자료로부터 CDHEs를 산출하는 데에는 Claassen et al. (2023)에서 제시한 MYRIAD-Hazard Event Sets Algorithm (MYRIAD-HESA)을 활용하였다. MYRIAD-HESA는 서로 다른 재해가 시공간적으로 겹쳐 발생하게 되었을 때, 이들의 발생 순서를 고려해 하나의 복합 재해 사례(pair)로 생성한다(Claassen et al., 2023; Lee et al., 2024). 예를 들어, 특정 격자 지점에서 폭염이 1/10~1/15, 가뭄이 1/12~1/20 동안 발생했다면, 발생 위치가 동일하고 겹치는 시점(1/12~1/15)이 존재하기 때문에 이들은 한 건의

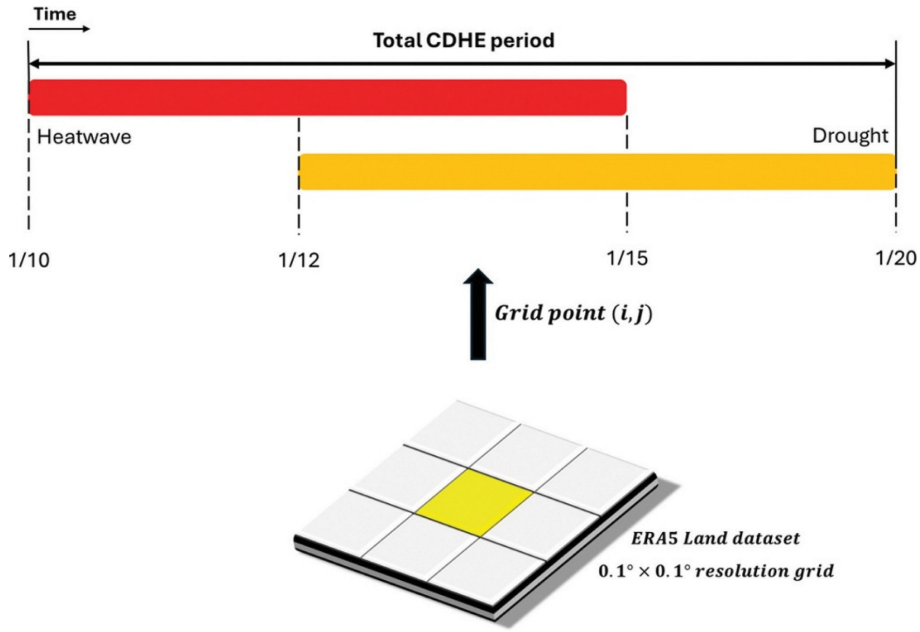


Fig. 1. Schematic diagram of CDHE pair generation process example.

CDHEs 사례로 산출된다(Fig. 1 참조). 즉 본 연구에서는 시공간적으로 중복된 폭염과 가뭄을 묶어 하나의 CDHEs 사례로 정의하고, 그 개수를 '사례 수(단위: 건)'로, 각 사례를 구성하는 폭염과 가뭄의 총 발생 기간(Fig. 1에서는 1/10~1/20)을 '지속 기간'으로 정의하였다. 또한, 연도별 각 CDHEs의 지속 기간을 합한 값을 '연간 총 발생 일수'로, 특정 기간(예: 5년, 10년 등) 동안의 연간 총 발생 일수 평균을 '발생 빈도'로 정의하였다. 이를 바탕으로 CDHEs의 특성과 발생 경향을 더욱 정밀하게 분석하였으며, 직관적인 해석을 위해 격자별로 산출된 사례 수와 발생 일수를 단위 면적(100 km^2) 기준으로 변환하였다. 추가적으로, 단일 재해 대비 복합 재해의 강도를 비교하기 위하여 각 폭염 기간의 최고 일평균 기온 값과 가뭄 기간의 최소 DEDI 값을 계산하였다.

2.3 부문별 기후 리스크 산출

본 연구에서는 CDHEs가 직·간접적 영향을 끼칠 수 있는 건강과 농업 부문 리스크 평가를 시범적으로 진행하였다. 평가 대상은 17개의 국내 행정구역(특별시/도)으로 설정하였으며, 리스크 평가에 활용한 자료의 제공 시점을 고려하여 2013~2022년을 분석 기간으로 하였다. 또한, 분석 기간 중 발생한 전체 폭염과 가뭄 자료를 각각 건강 및 농업 부문 리스크 평가에 적용하여 CDHEs의 경우와 비교하였다. 현재 국내 기후 리스크 평가가 복합 재해 여부를 고려하지 않고 수행되기에, 이를 통해 CDHEs 대상 리스크 평가 도입 필요성을 고찰하였다.

식(1)에서 각 항목들은 서로 다른 단위를 가지기에, 변수들의 표준화가 필요하다. 일반적으로 Z-score 등의 방식이 적용될 수 있지만, 본 연구에서는 Oh and Won (2023)에서 사용한 각 자료의 범주를 고려하는 min-max scaling 방식을 활용하여 0~1 사이로 변환하였다. 이때, 최종 기후 리스크와 비례하는 관계를 가지는 자료는 식(4a)를, 대응 항목과 같이 반비례하는 경우는 식(4b)를 활용하였다. 그 후, 변환된 4개의 항을 곱하여 분석 기간(2013~2022)의 연도별 기후 리스크 값을 계산한 뒤, 이를 0~100 사이 값으로 변환해 지역마다 리스크 추이를 분석하였다. 또한, 행정구역 간 상대적 비교를 위해 이 값을 지역별로 평균한 후, 다시 0~100 사이 값으로 변환하여 5개의 상대적 위험 등급으로 분류하였다(Table 2).

재해 항목의 경우 두 부문 모두 단위 면적 당 연간

Table 2. The criteria for risk level classification.

Risk	Classification
0~20	Very Low
20~40	Low
40~60	Medium
60~80	High
80~100	Very High

총 CDHEs 발생 일수 자료를 사용하였다. 이는 행정구역의 면적이 넓을수록 포함되는 격자의 수가 많아져 총 CDHEs 일수에 직접적인 영향을 줄 수 있기 때문이다. 각 행정구역의 면적 자료로는 국토교통부의 지적통계연보에 기재된 2023년 행정구역 별 국토 현황 자료를 사용하였다. 이외에 다른 항목들(노출, 취약성, 대응)은 선행 연구 사례에 기반하여, 통계청이 제공하는 국가통계포털(Korean Statistical Information Service, KOSIS)로부터 자료를 제공받아 사용하였다.

$$\bar{x}^{+} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (4a)$$

$$\bar{x}^{-} = \frac{x_{max} - x}{x_{max} - x_{min}} \quad (4b)$$

2.3.1 건강 부문

건강 부문의 경우, 세종시의 대응 항목 자료가 부재하여 이를 제외한 총 16개 시도를 대상으로 설정하였다. 각 항목별로 활용한 자료 및 출처는 Table 3과 같다. 노출 항목으로는 각 행정구역 별 추계인구 자료를 사용하였다. 이때 단위 면적은 고려하지 않았는데, 그 이유는 서울특별시와 부산광역시의 인구 밀도가 지나치게 높게 나타나 기후 리스크 결과가 노출 항목에만 의존하였기 때문이다. 취약성 항목의 경우 동일한 CDHEs에 노출되더라도 신체적 특성 등에 기인하여 이에 더욱 취약할 수 있는 소년과 노인의 인구 비율을 고려하기 위해(Eum, 2016; Na and Won, 2023), 전체 인구에 대한 소년 인구(0~14세)와 노인 인구(65세 이상)의 비율 자료를 활용하였다. 마지막으로 대응 항목의 경우 CDHEs로 인한 온열 질환자가 발생했을 때 그 피해를 경감할 수 있는 지표 중 하나로 선정하였다. 선행 연구(Oh and Won, 2023)에서 무더위 쉼터, 보건소 개수 등의 자료가 활용된 점을 참고하여, 본 연구에서는 인구 십만 명 당 응급의학 전문의 수 자료를 활용하여 온열 질환자가 응급실에 내원하였을 때 처치를 받을 수 있는 정도를 평가에 반영하였다.

2.3.2 농업 부문

농업 부문에서는 CDHEs로 인해 발생하는 폭염과 기상학적 가뭄으로 인한 복합적 작물 피해를 대상으로, 유사 연구 사례(Zhang et al., 2023)에 기반하여 리스크 평가 항목별 자료를 선정하였다(Table 3). 노출 항목의 경우 각 행정구역 별 경지 면적 자료를 활용하였다. 여기서 경지 면적이란 현실적으로 농작물 재배가 가능한 토지를 지칭하며, 논과 밭의 면적을 합하여 산출하였다. 취약성 항목의 경우 식(5)와 같이 전체 경지 면적 중 수리불안전답(수리시설 미비로 주로 자연에 의존하여 관개하는 논)과 밭 면적의 비율을 활용하여, 가뭄 시기에 상대적으로 물 공급 측면에서 취약할 수 있는 정도를 반영하였다. 대응 항목의 경우, 국가별 국내총생산 자료를 활용한 선행 연구 사례(Carrão et al., 2016; Ahmadalipour and Moradkhani, 2018)를 참고하여, 각 행정구역 별 재정자립도 자료를 활용하였다. 재정자립도는 일반 회계의 세입 중 지방세와 세외수입의 비율로 계산되며, 각 행정자치단체가 CDHEs로 인한 농작물 피해 경감을 위해 관련 정책 혹은 기술에 투자할 수 있는 잠재적 적응 능력의 지표를 나타낸다(Park et al., 2017). 본 연구에서는 잉여금, 이월금, 전입금, 예탁 및 예수금이 포함되어 산출되는 세입과목개편 전 재정자립도 값을 활용하였다.

$$\text{농업 부문 취약성} = \frac{\text{밭 면적} + \text{수리불안전답 면적}}{\text{전체 경지 면적}} \quad (5)$$

3. 연구 결과

3.1 국내 CDHEs 발생 현황 및 특징 분석 결과

분석 기간(1979~2023) 동안의 지역별 누적 CDHEs 현황을 살펴본 결과, 서울특별시, 경기도, 경상북도, 경상남도, 전라남도가 주요 발생지로 파악되었으며, 전국적으로 CDHEs는 평균 약 11.4일의 지속 기간을

Table 3. Climate risk assessment indicators for each sector.

Sector	Terms	Dataset	Source
Health	Exposure	Population	Korean Statistical Information Service (KOSIS)
	Vulnerability	Population ratio of youth (aged 0~14) and elderly (aged 65 and over)	
	Response	Number of emergency physicians per 100,000 population	
Agricultural	Exposure	Farmland area	
	Vulnerability	The proportion of areas relatively vulnerable in terms of water supply during drought periods	
	Response	Financial independence of local government	

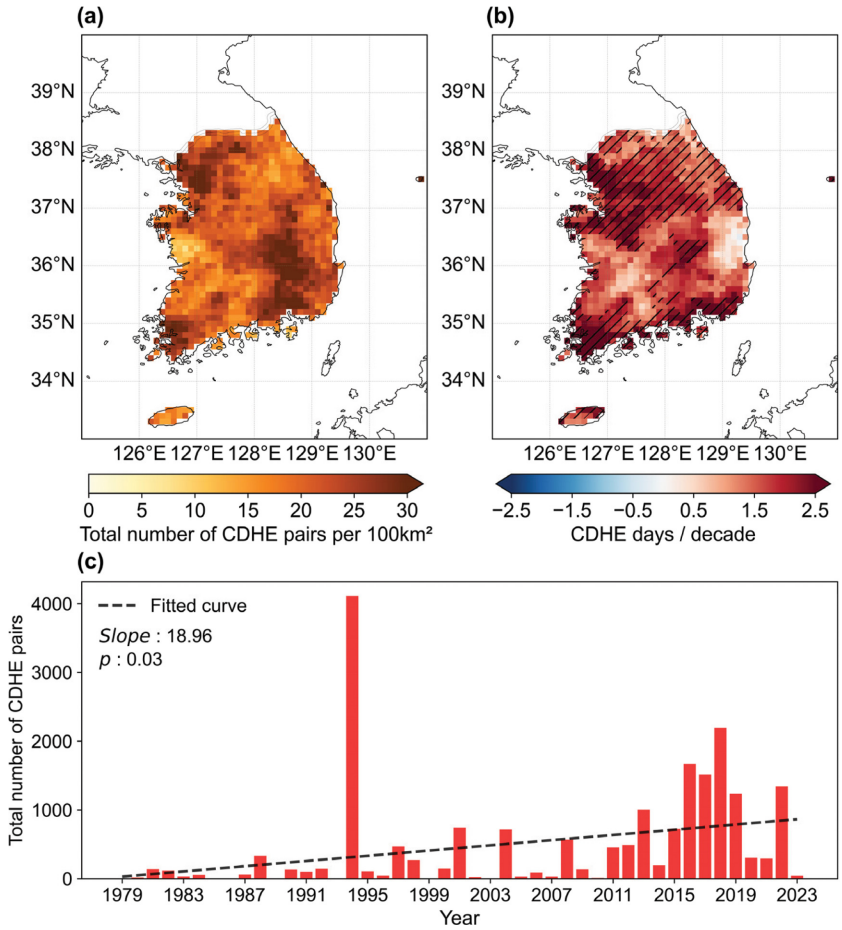


Fig. 2. The spatio-temporal pattern of CDHEs in Republic of Korea. (a) The total cumulative number of CDHE pairs per 100 km^2 observed during the period 1979~2023, (b) the trend of CDHE days per decade, and (c) the temporal evolution of CDHE occurrence. In (b), the statistically significant values at the 90% confidence level are hatched. In (c), the black dashed line represents the trend estimated by a simple linear regression method.

보였다(Fig. 2a). 특히, 국내 거주 인구 밀집 지역과 주요 쌀 생산지가 이에 포함되어, 온열 질환자 발생이나 작물 생산량 저하 등의 피해가 크게 발생할 수 있다는 점에서 주목할 만하다.

또한, 단위 면적을 고려하여 각 격자에서 발생한 CDHEs 사례 수를 연도별로 합산해 그 추이를 분석하였다. 그 결과, 전체 분석 기간 동안 연평균 총 CDHEs 사례 수는 약 446.3건에 그쳤으나, 최근 10년(2014-2023) 동안에는 약 951.5건으로 나타나는 등 급증 양상을 보였다(Fig. 2c). 최다 발생 시기는 1994년으로, 강한 폭염과 가뭄이 동반되어 총 4,113건이 발생하였으며, 주로 경상북도 지역에서 집중적으로 나타났다. 그리고 최근 극심한 폭염 피해가 발생한 2016년과 2018년에는 각각 1,670건, 2,194건이 발생하여 그 뒤를 이었다. 이는 1994년의 발생 현황을 제외하고 보았을 때, 우리나라에서 CDHEs 발생이 증가하고 있음을 시사한다. 위 사실은 연간 총 CDHEs 발생 일수의 10년 단위 증가 경향을 나타낸 Fig. 2b에서도 확인되는데, 수도권, 강원도, 전라남도, 제주도를 포함한 국내 전체 면적의 약 55.2%에서 90% 신뢰 수준으로 유의하게 평균 약 1.8일 $10년^{-1}$ 크기의 증가 경향이 나타났다.

이와 함께 CDHEs, 즉 복합 재해와 단일 재해의 강도를 비교하였다. 그 결과 복합 재해의 강도가 더 높았던 것으로 확인되었다(Fig. 3). 폭염의 경우, 단일 재해로 발생하였을 때 최대 일평균 온도의 평균이 약 23.7°C에 그친 반면, 복합 재해의 경우 25.4°C로 나타났다(Fig. 3a). 또한, 최다 발생 빈도를 보인 온도가 각

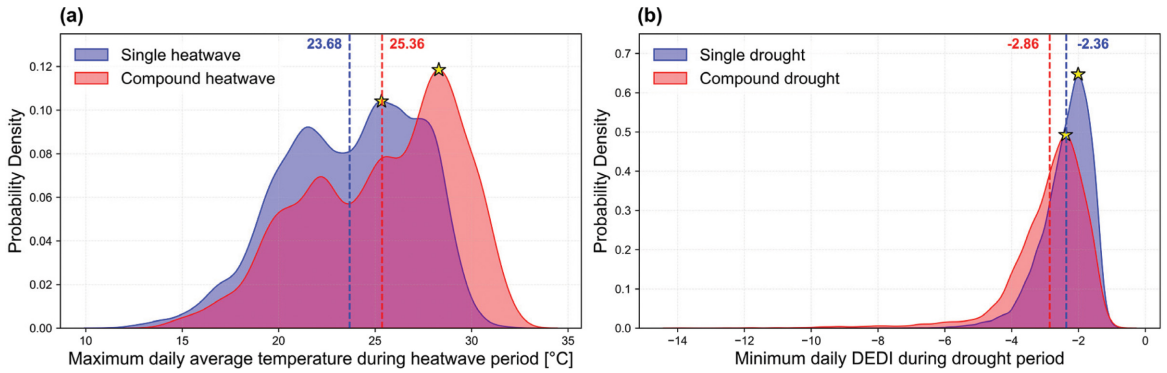


Fig. 3. Intensity comparison between CDHEs and single events in Republic of Korea. (a) The probability density function (PDF) graphs for the maximum daily average temperature during single heatwave (heatwaves only) and compound heatwave events (heatwaves during CDHEs) which occurred in the study period (1979~2023), and (b) PDF graphs for the minimum daily DEDI during single drought (droughts only) and compound drought events (droughts during CDHEs). The blue and red vertical dashed lines indicate that the mean value for each case. The yellow-colored star markers indicate the extremum location for each PDF graph. Note that a lower value of DEDI in (b) indicates a more severe drought.

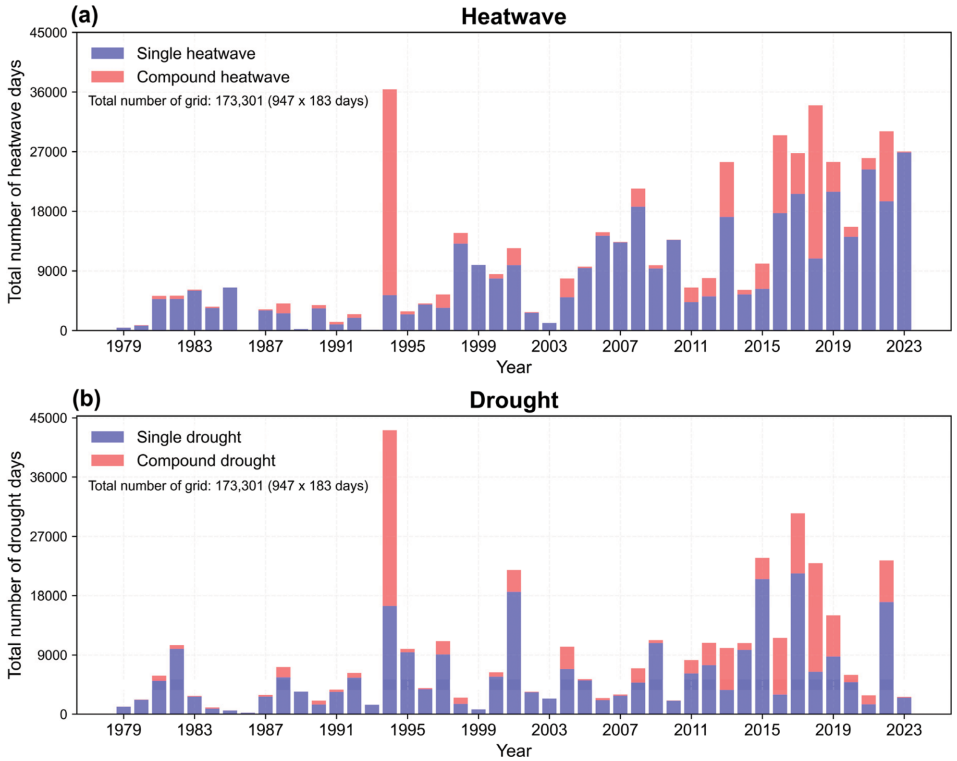


Fig. 4. Total number of single and compound event days during the period 1979~2023 for (a) heatwaves and (b) droughts. Note that the length of compound event days was determined by the duration of heatwave and drought events that occurred during CDHEs.

각 약 25.3°C와 28.3°C로 파악되어, 복합 재해 시기에 더 강한 폭염이 다수 발생한 것으로 확인되었다. 마찬가지로 가뭄 역시 단일 재해일 때 최소 DEDI 값의 평균이 약 –2.4이었던 반면, 복합 재해일 때는 약 –2.9

로 나타났으며, 각각 –2와 –2.4에서 최다 발생 빈도를 보였다(Fig. 3b). 이때, 만약 해발 고도가 높아 상대적으로 폭염 강도가 약하게 나타날 수 있는 지역(강원도 등)에서 단일 재해가 집중적으로 발생했다면, 이러한 지역적 특성 때문에 전체 단일 재해 강도가 낮게 나타났을 수 있다. 이를 검증하기 위해 전체 분석 기간(1979~2023) 동안 단일 재해로 발생한 폭염과 가뭄의 공간 분포를 추가적으로 확인하였다(Appendix 1). 그 결과, 전국적으로 단일 폭염과 가뭄 모두 지역별로 큰 차이 없이 발생한 것으로 나타나, 전체 단일 재해 강도가 이로 인해 저하된 것은 아닌 것으로 나타났다. 이는 복합 재해 시기 폭염과 가뭄이 매우 강하게 나타나 단일 재해에 비해 큰 피해가 초래될 수 있음을 시사한다.

또한 연도별 총 발생 일수를 살펴본 결과, 전국적으로 폭염 및 가뭄 발생 일수가 많았던 해일수록 복합 재해의 비율이 높았던 것으로 나타났다. 전체 폭염 중 복합 재해로 나타난 비율은 1994년과 2018년에 각각 85.4%, 68.1%를 기록하여 다른 연도에 비해 압도적으로 높게 나타났으며, 복합 재해로 발생한 가뭄의 비율 역시 1994년에 61.9%, 2018년에 72%를 기록하는 등 유사한 경향성이 확인되었다(Fig. 4). 물론, 1994년과 2018년에 전국적으로 큰 폭염 및 가뭄 피해가 발생한 이유가 단지 높은 CDHEs 비율에만 기인하였다고 볼 수는 없으나, 당시 다수의 폭염과 가뭄이 동시에 발생하여 피해를 증폭시키는 데 직접적인 기여를 한 것으로 판단된다. 이 두 해의 사례를 제외하더라도 최근 CDHEs의 비율이 과거 대비 상승하고 있기에, 향후 더 큰 피해가 발생할 가능성이 우려된다. 또한, 연간 총 폭염 일수가 가뭄에 비해 뚜렷한 증가 추세를 보이는데, 이로부터 과거보다 폭염이 더 빈번하고 강하게 나타나 지면의 증발산량을 촉진하여 돌발 가뭄을 더욱 쉽게 야기할 수 있게 되었음을 생각할 수 있다. 즉, 폭염 일수의 증가가 국내에서의 CDHEs 증가에 직접적인 영향을 미치고 있는 것으로 추정된다.

위 결과는 CDHEs의 최근 주요 발생 위치가 국내 인구 밀집 지역인 수도권과 쌀 생산 핵심 지역인 전

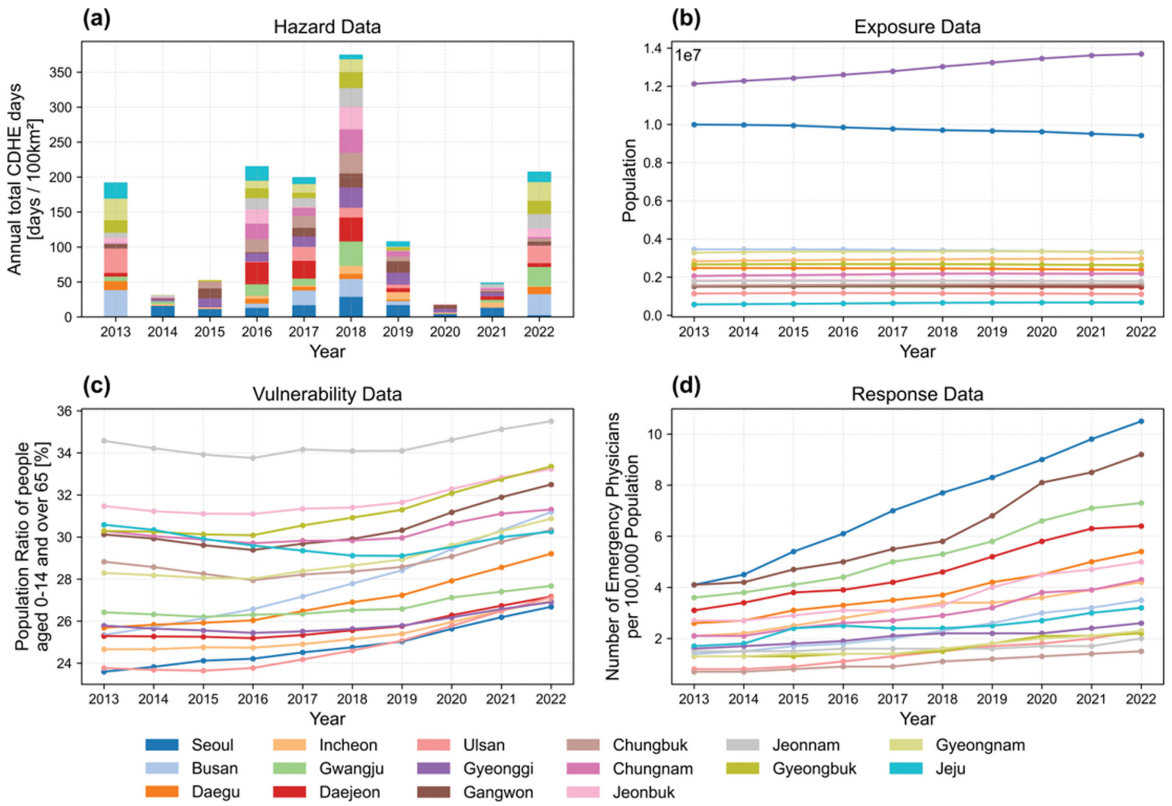


Fig. 5. Contributions of (a) hazard (CDHE days per unit area), (b) exposure (population), (c) vulnerability (population ratio of youth and elderly), and (d) response (number of emergency physicians per 100,000 population) to health sector risks of CDHEs for each administrative district. Sejong was excluded from the analysis due to the lack of dataset.

라남도와 경상북도 등임을 고려할 때, 이로 인한 잠재적 피해 리스크가 급증하고 있음을 시사한다. 특히 전국적으로 많은 폭염과 가뭄이 발생하였던 연도일수록 복합 재해로 나타난 비율이 높게 기록되어, 기존의 단일 재해만을 대상으로 하는 기후 리스크 평가로는 폭염과 가뭄으로 인한 복합적 피해를 충분히 고려하지 못하고 과소평가할 수 있다. 따라서 CDHEs를 대상으로 하는 기후 리스크 평가 및 관리 역시 적극적으로 병행하여, 극한 기후 현상으로 인한 리스크를 더욱 입체적으로 진단하고 대응해야 할 것이다.

3.2 기후 리스크 평가 결과

3.2.1 건강 부문

세종시를 제외한 16개 시도 대상 건강 부문 리스크 평가에서 사용한 4가지 항목의 원시 자료 값과 재해 항목으로 활용된 단위 면적 당 연간 총 CDHEs 발생일수 경향은 Fig. 5a와 같았다. 16개 시도에서 2018년에 가장 많은 CDHEs가 발생하였으며, 분석 기간 동안 부산광역시가 총 127.2일 100 km^{-2}로 최다 발생을 기록하였고, 서울특별시(총 121.9일 100 km^{-2})가 그 뒤를 이었다. 또한, 인천광역시의 경우 총 43.5일 100 km^{-2}로 가장 적은 CDHEs 발생을 보였다. 노출 항목으로 사용된 행정구역 별 인구 자료는 경기도와 서울특별시가 타 지역에 비해 높은 값을 보였으며, 두 도시 간 인구 격차도 최근 들어 커짐이 파악되었다(Fig. 5b). 취약성 항목으로 사용된 전체 인구 중 소년과 노인 인구 비율 자료는 전라남도 지역이 연구 기간 동안 평균 약 34.4%의 값을 보이며 가장 높은 값을 기록했다(Fig. 5c). 그리고 대응 항목으로 사용된 인구 십만 명 당 응급의학 전문의 수 자료의 경우 모든 행정

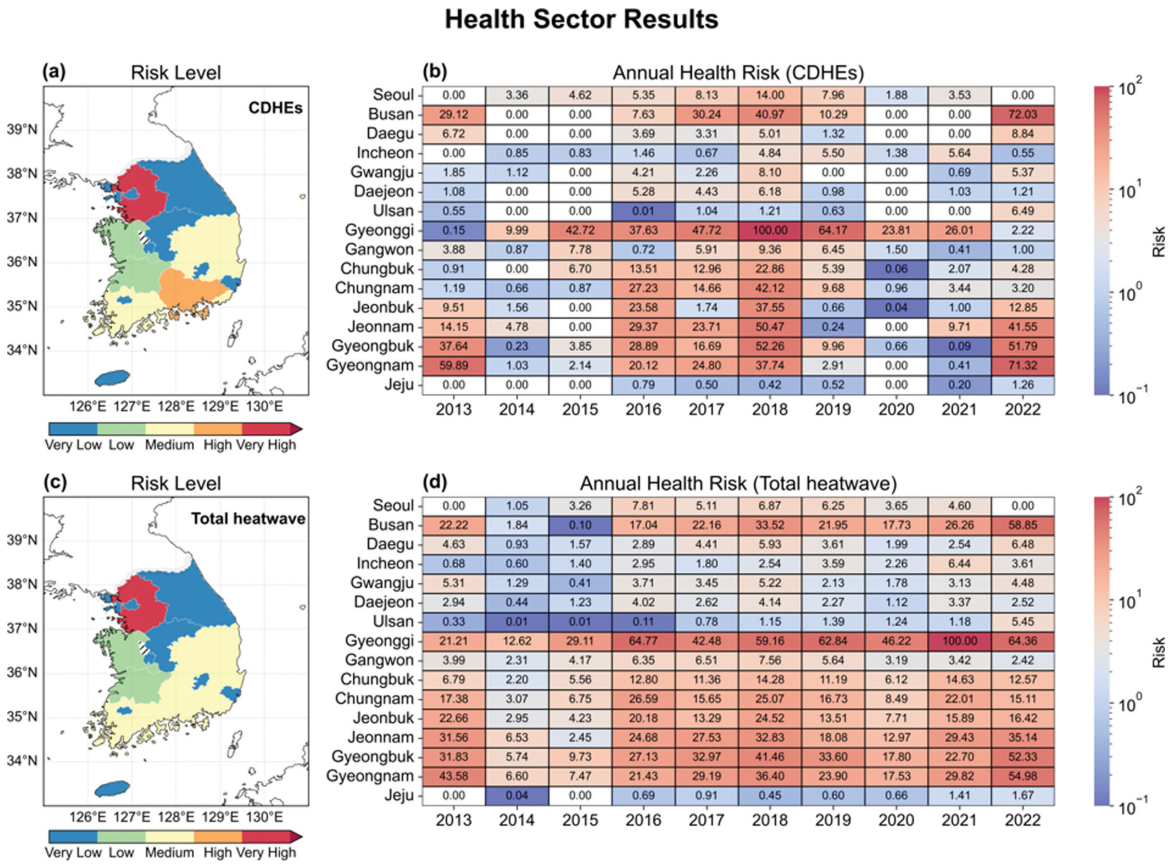


Fig. 6. Health sector risk assessment results for CDHEs and total heatwave events. (a) Health sector risk levels of CDHEs for each administrative district over the period 2013~2022. Note that the hatched region (Sejong) indicates the area that was excluded due to the lack of dataset. All values were transformed into the range of 0~100, and classified into five levels. (b) Annual health sector risk values for each administrative district. The white color indicates that the risk value was zero, and the log scale color bar was applied. (c-d) Same as (a-b), but for total heatwave events.

Table 4. Transformed values of average CDHE risks and classified levels by administrative district for the health and agricultural sectors (2013~2022). All values were normalized to a 0~100 scale and categorized into five risk levels.

Administrative District	Sector			
	Health		Agricultural	
	Risk value	Classification	Risk value	Classification
Seoul	12.9	Very Low	0	Very Low
Busan	53.2	Medium	0.8	Very Low
Daegu	7.2	Very Low	0.9	Very Low
Incheon	5.1	Very Low	1.3	Very Low
Gwangju	5.7	Very Low	0.7	Very Low
Daejeon	4.7	Very Low	1.5	Very Low
Ulsan	1.8	Very Low	0.8	Very Low
Sejong	-	-	1.5	Very Low
Gyeonggi-do	100	Very High	25.9	Low
Gangwon-do	9.8	Very Low	60.4	High
Chungchungbuk-do	18.6	Very Low	45.3	Medium
Chungchungnam-do	28.6	Low	27.2	Low
Jeollabuk-do	24.2	Low	24.2	Low
Jeollanam-do	48.6	Medium	93.1	Very High
Gyeongsangbuk-do	56.6	Medium	100	Very High
Gyeongsangnam-do	61.8	High	25.2	Low
Jeju-do	0	Very Low	56.5	Medium

구역에서 전반적인 상승세를 보였으며, 서울특별시, 강원도, 광주광역시 순으로 높았다(Fig. 5d).

최종적으로 산출한 건강 부문 평균 기후 리스크 등급은 Fig. 6a와 같았으며, 연도별 리스크 값 분포는 Fig. 6b와 같았다. 시도별 리스크 등급은 Table 4에 정리하였다. 건강 부문 기후 리스크는 경기도가 가장 높은 '매우 높음' 등급에 해당했으며, 경상남도가 '높음', 경상북도, 부산광역시, 전라남도가 '중간' 등급에 해당했다. 특히, 최근 들어 가장 높은 리스크 등급을 보인 경기도에서 CDHEs 발생 빈도가 급증하였다는 점이 주목된다. 실제로 2010년 이전에는 경기도 지역에서 연평균 약 2일 100 km^{-2} 수준에 머물렀으나, 2010년 이후에는 연평균 약 9일 100 km^{-2} 수준으로 발생이 급증하였다. 다만, 본 분석에서는 기후 리스크 평가 항목별 기여도 분석을 실시하지 않았기에, 추후 각 항목들의 기여도를 정량적으로 파악하여 CDHEs의 급증이 최종 리스크 값에 어느 정도 영향을 미치는지 상세하게 분석할 필요가 있다.

추가적으로, 분석 기간 동안 발생한 전체 폭염에 대해서도 동일한 방식으로 평가를 진행하였다(Figs. 6c, d). 그 결과, 앞선 CDHEs의 경우와 마찬가지로 경기도가 가장 높은 리스크를 보였다(Fig. 6c). 그러나, 2021년에 리스크의 최댓값이 나타났으며(Fig. 6d), 경상남도의 경우 본래 '높음' 등급에 속하였지만 '중간' 등급으로 낮게 나타나 리스크가 과소평가됨을 확인하였다.

3.2.2 농업 부문

농업 부문 리스크 평가의 4가지 항목 원시 값은 Fig. 7과 같았다. 재해 항목의 경우 건강 부문 리스크 평가와 동일한 자료를 활용하였으며, 세종시의 경우 2016, 2017, 2018년에 평균 26.6일 100 km^{-2}의 많은 CDHEs가 발생하였다(Fig. 7a). 노출 항목으로 사용한 경지 면적 자료의 경우, 전라남도(평균 293,451 ha), 경상북도(평균 264,105.8 ha)가 각각 1, 2위로 파악되었다(Fig. 7b). 취약성 항목에서는 제주도가 거의 100%에 가까운 값을 보여 타 시도에 비해 그 값이 매우 높았다(Fig. 7c). 이는 제주도의 경지 면적 대부분이 논이 아닌 밭으로 구성되어 있기 때문으로, 본 연구에서는 밭 면적 역시 취약성 항목 계산에 포함하였기 때문이다. 대응 항목으로 사용된 각 행정구역 별 재정자립도 자료의 경우, 서울특별시가 83.6으로 가장 높았고, 경기도가 67.7로 그 뒤를 이었다(Fig. 7d).

최종적으로 산출된 농업 부문 평균 기후 리스크 값은 Fig. 8a에 제시된 바와 같았으며, 연도별 리스크 값 분포는 Fig. 8b와 같았다. 리스크 등급은 Table 4에 정리하였다. 농업 부문 기후 리스크는 경상북도와 전라남도가 가장 높은 등급인 '매우 높음'에 해당했으며, 강원도는 '높음', 충청북도와 제주도는 '중간' 등급에 해당했다. 특히, 앞선 건강 부문 평가의 경기도 사례와 유사하게, 이들 지역 역시 최근 들어 CDHEs 노출도가 급증한 것이 확인되었다. 실제로 2010년 이

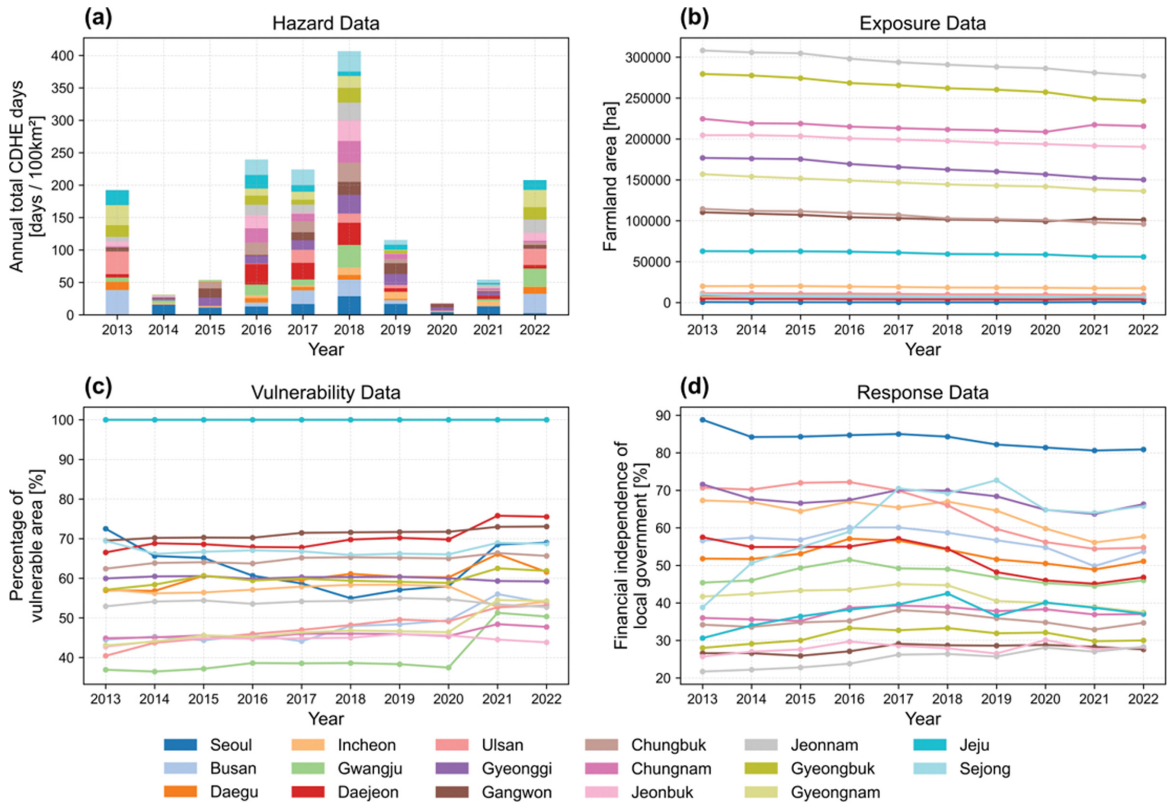


Fig. 7. Contributions of (a) hazard (CDHE days per unit area), (b) exposure (farmland area), (c) vulnerability (the proportion of areas relatively vulnerable in terms of water supply during drought periods), and (d) response (financial independence of local government) to agricultural sector risks of CDHEs for each administrative district.

전에는 CDHEs의 발생 빈도가 각각 연평균 약 2.8일 100 km^{-2}, 1.5일 100 km^{-2}에 그쳤으나, 2010년 이후에는 8일 100 km^{-2} 및 7.4일 100 km^{-2} 수준으로 나타났다. 다만, 시기에 따라 취약성, 대응 항목 값 역시 변화하므로, CDHEs의 급증이 최종 기후 리스크에 기여한 정도는 추후 연구를 통해 파악해야 할 것이다.

이와 함께, 분석 기간 동안 발생한 전체 가뭄에 대해서도 농업 부문 리스크 평가를 진행하였다(Figs. 8c, d). 그 결과, CDHEs를 활용한 결과에서 '매우 높음'을 보인 전라남도의 경우 '높음' 등급을, 강원도는 기존 '높음' 등급에서 '매우 높음'을 기록하는 등 일부 지역에서 차이를 보였다. 특히 전체 가뭄을 대상으로 한 경우에서 리스크가 상대적으로 작게 나타난 전라남도, 경상남도, 제주도의 경우 CDHEs를 고려하지 않을 시 리스크가 과소평가될 수 있으며, 이로 인한 잠재적 피해에 대해 적절한 대응이 이루어지지 않을 우려가 있다. CDHEs의 강도가 단일 재해보다 강하다는 특징이 앞서 확인되었기에(Fig. 3), 이를 대상으로 한 리스크 평가와 관리가 적극적으로 이행되어야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 최근 전 세계적으로 급증하고 있는 폭염-가뭄 복합 재해(CDHEs) 현상에 주목하여, 우리나라에서의 발생 추이 및 주요 발생 지역을 분석하였다. 분석 기간(1979~2023) 동안 우리나라에서 발생한 CDHEs 현황을 살펴본 결과, 수도권 지역과 전라남도 지역 등에서 통계적으로 유의미한 수준의 증가가 확인되었다. 또한, 단일 재해와의 비교를 통해 복합 재해 형태로 발생한 시기에 폭염과 가뭄이 더욱 강하게 나타났으며, 전국적으로 폭염과 가뭄이 많이 발생한 연도일수록 복합 재해 형태로 발생한 비율이 매우 높았음을 확인하였다.

산출된 복합 재해 자료를 활용하여 CDHEs가 큰 피해를 끼칠 수 있는 건강과 농업 부문을 대상으로 기후 리스크 평가를 진행하였다. 건강 부문 결과에서는 경기도가 가장 높은 위험도인 '매우 높음' 등급에 속했으며, 경상남도는 '높음', 경상북도, 부산광역시, 전라남도가 '중간' 등급으로 그 뒤를 이었다. 농업 부문

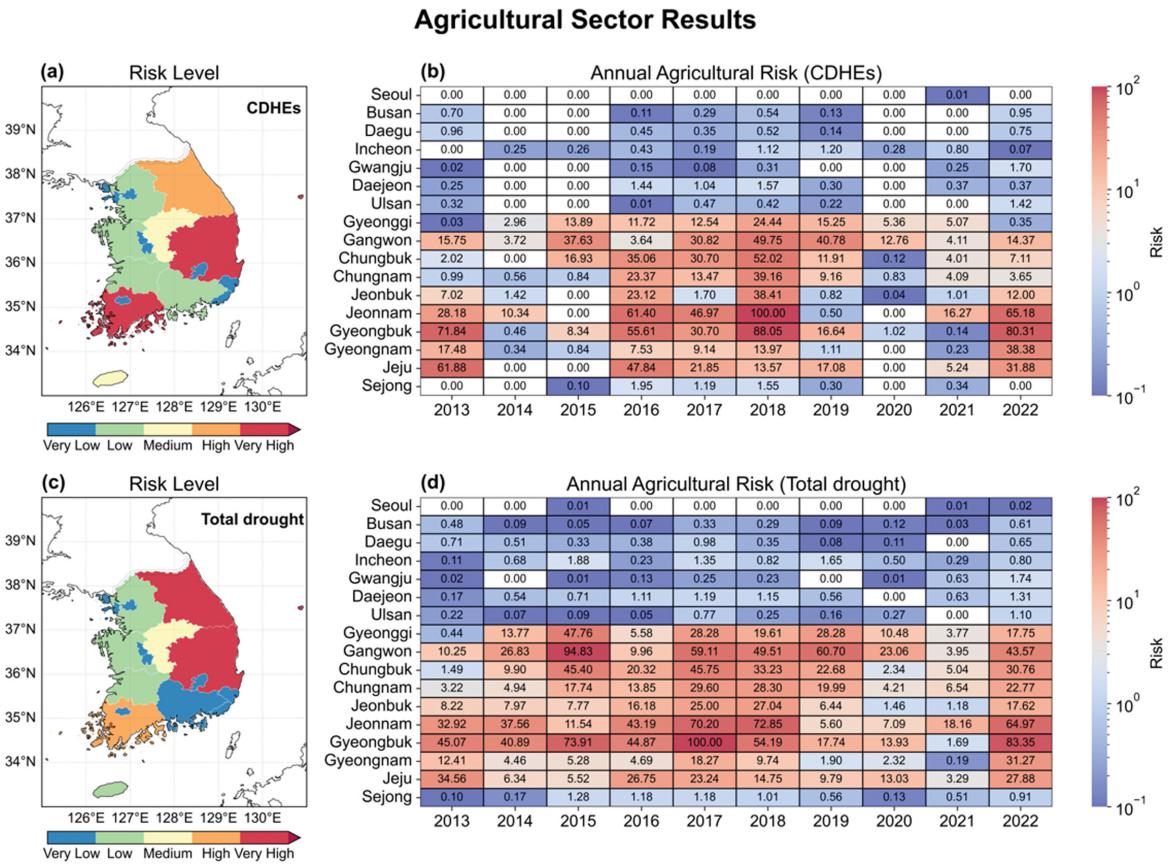


Fig. 8. Agricultural sector risk assessment results for CDHEs and total drought events. (a) Agricultural sector risk levels for each administrative districts over the period 2013~2022. All values were transformed into the range of 0~100, and classified into five levels. (b) Annual agricultural sector risk values for each administrative district. The white color indicates that the risk value was zero, and the log scale color bar was applied. (c-d) Same as (a-b), but for total drought events.

결과에서는 국내 쌀 주요 생산지인 전라남도와 경상북도가 '매우 높음' 등급에 속했으며, 강원도는 '높음', 충청북도와 제주도는 '중간' 등급에 해당했다. 추가적으로 리스크 분석 기간(2013~2022) 동안 발생한 전체 폭염, 가뭄을 각각 건강, 농업 부문 리스크 평가에 적용한 결과, 경상남도와 전라남도 지역 등 일부 지역에서 리스크 값이 과소평가되는 등 CDHEs로 인한 리스크를 적절히 반영하지 못하는 것으로 파악되었다.

본 연구는 처음으로 우리나라에서 발생한 CDHEs의 발생 빈도 및 강도 증가를 확인함과 동시에, 이에 대한 기후 리스크 평가 필요성을 보였다는 측면에서 의의가 있다. 현재까지는 주로 폭염, 가뭄, 홍수 등의 단일 재해에만 초점을 맞추어 국내 대상 기후 리스크 평가가 이루어졌으나, 향후에는 분석 대상의 범주를 복합 재해로 넓혀야 할 것이다. 이를 통해 극한 기상현상이 가져올 수 있는 기후 리스크를 보다 정밀하게 파악하고, 적극적인 대응을 통해 잠재적으로 발생할 수 있는 피해를 경감해야 한다. 특히, 또 다른 유형의 복합 재해 중 하나로 폭염이 발생한 이후 극한 강수가 이어지는 현상인 폭염-극한 강수 복합 재해에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 최근 들어 발생 빈도의 증가가 관측되고 있으며, 탄소 배출량이 높은 기후 시나리오일수록 그 빈도 및 강도가 증가할 것으로 전망되어(Zhou et al., 2024) 많은 관심이 필요하다. 본 연구에서 분석한 CDHEs뿐 아니라 다른 종류의 복합 재해에 대해서도 연구가 이루어져야 하는 이유다.

본 연구의 한계점은 다음과 같다. 첫째, 산출된 CDHEs 자료의 해상도 문제로 인해 시·군·구 수준에서 세부적인 기후 리스크 평가를 수행하지 못했다. 물론, $0.1^{o} \times 0.1^{o}$ 해상도의 관측 자료를 사용함으로써 각 행정구역의 평균 기온 및 가뭄 지수를 사용하는 방식보다 더 정밀하게 CDHEs 발생 현황을 분석할 수

있었다. 그러나 동일한 특별시/도 내에서도 지역에 따라 CDHEs 발생 일수와 거주 인구에 차이가 있을 수 있으므로, 향후 연구에서는 더 높은 해상도의 자료를 통한 추가 분석이 필요하다. 둘째, 기후 리스크 평가 과정에서 각 항목마다 하나의 자료만을 선정해 활용한 점도 한계로 지적된다. 실제로는 CDHEs로 인한 기후 리스크에 영향을 미치는 다양한 요인이 존재하기 때문에, 평가 항목에 적합한 자료 선정에 대한 추가 연구가 필요하다. 마지막으로, 각 리스크 평가 항목이 최종 리스크 값에 얼마나 영향을 미치는지 정량적으로 파악하는 기여도 분석이 이루어지지 않았다. 기후 리스크는 재해, 노출도, 취약성, 대응 항목 모두에 직접적인 영향을 받기에, 이러한 부분은 추후 구체적으로 규명할 필요가 있다. 각 부문별 취약성과 대응 항목에 대한 연구자들과의 협업을 통해 향후 더욱 정교한 리스크 평가를 수행해야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 “신기후체제 대응 환경기술개발산업”의 지원(2022003560001)과 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원[NO. RS-2021-II211343, 인공지능대학원지원(서울대학교)]을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

Aghakouchak, A., and Coauthors, 2020: Climate extremes and compound hazards in a warming world. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **48**, 519-548, doi:10.1146/annurev-earth-071719-055228.

Ahmadalipour, A., and H. Moradkhani, 2018: Multi-dimensional assessment of drought vulnerability in Africa: 1960~2100. *Sci. Total Environ.*, **644**, 520-535, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.07.023.

Bastos, A., and Coauthors, 2021: Vulnerability of European ecosystems to two compound dry and hot summers in 2018 and 2019. *Earth Syst. Dynamics*, **12**, 1015-1035, doi:10.5194/esd-12-1015-2021.

Benson, D. O., and P. A. Dirmeyer, 2021: Characterizing the relationship between temperature and soil moisture extremes and their role in the exacerbation of heat waves over the contiguous United States. *J. Climate*, **34**, 2175-2187, doi:10.1175/JCLI-D-20-0440.1.

Carrão, H., G. Naumann, and P. Barbosa, 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, doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.04.012.

Chiang, F., P. Greve, O. Mazdiyasni, Y. Wada, and A. AghaKouchak, 2022: Intensified likelihood of concurrent warm and dry months attributed to anthropogenic climate change. *Water Resour. Res.*, **58**, e2021WR030411, doi:10.1029/2021WR030411.

Choi, Y.-S., and Coauthors, 2024: Estimation of physical climate risk for private companies. *Atmosphere*, **34**, 1-21, doi:10.14191/Atmos.2024.34.1.001 (in Korean with English abstract).

Claassen, J. N., P. J. Ward, J. Daniell, E. E. Koks, T. Tiggeloven, and M. C. de Ruiter, 2023: A new method to compile global multi-hazard event sets. *Sci. Rep.*, **13**, 13808, doi:10.1038/s41598-023-40400-5.

Eum, J.-H., 2016: Vulnerability assessment to urban thermal environment for spatial planning - A case study of Seoul, Korea. *J. Korean Inst. Landsc. Archit.*, **44**, 109-120, doi:10.9715/kila.2016.44.4.109 (in Korean with English abstract).

Hao, Z., and Coauthors, 2022: Compound droughts and hot extremes: Characteristics, drivers, changes, and impacts. *Earth Sci. Rev.*, **235**, 104241, doi:10.1016/j.earscirev.2022.104241.

IPCC, 2023: *Point of Departure and Key Concepts. In: Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Cambridge University Press, 121-196.

Lee, R., and Coauthors, 2024: Reclassifying historical disasters: From single to multi-hazards. *Sci. Total Environ.*, **912**, 169120, doi:10.1016/j.scitotenv.2023.169120.

Leonard, M., and Coauthors, 2014: A compound event framework for understanding extreme impacts. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change*, **5**, 113-128, doi:10.1002/wcc.252.

Lisonbee, J., M. Woloszyn, and M. Skumanich, 2022: Making sense of flash drought: definitions, indicators, and where we go from here. *J. Appl. Service Climatol.*, **2021**, 1-19, doi:10.46275/JOASC.2021.02.001.

Mo, K. C., and D. P. Lettenmaier, 2016: Precipitation deficit flash droughts over the United States. *J. Hydrometeor.*, **17**, 1169-1184, doi:10.1175/JHM-D-15-0158.1.

Mukherjee, S., and A. K. Mishra, 2021: Increase in compound drought and heatwaves in a warming world. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2020GL090617, doi:10.1029/2020GL090617.

Muñoz Sabater, J., 2019: ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), Accessed on 06-07-2024, doi:10.24381/cds.e2161bac [Available online at https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-

land?tab=overview].

Na, Y. J., and J.-H. Won, 2023: The regional vulnerability assessment model of heat wave considering heat wave disaster vulnerable groups. *J. Saf. Crisis Manag.*, **13**, 1-8, doi:10.14251/jscm.2023.2.1.

Oh, H., and J. Won, 2023: Heat wave vulnerability assessment reflecting social anxiety. *J. Climate Change Res.*, **14**, 637-650, doi:10.15531/ksccr.2023.14.6.637 (in Korean with English abstract).

Park, D.-S. R., B. Park, and E. Jung, 2017: Guidelines for the VESTAP-based climate change vulnerability assessment. *J. Climate Change Res.*, **8**, 339-346, doi:10.15531/ksccr.2017.8.4.339 (in Korean with English abstract).

Ridder, N. N., and Coauthors, 2020: Global hotspots for the occurrence of compound events. *Nat. Commun.*, **11**, 5956, doi:10.1038/s41467-020-19639-3.

Rummukainen, M., 2012: Changes in climate and weather extremes in the 21st century. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change*, **3**, 115-129, doi:10.1002/wcc.160.

Seo, Y.-W., and K.-J. Ha, 2022: Changes in land-atmosphere coupling increase compound drought and heatwaves over northern East Asia. *npj Clim. Atmos. Sci.*, **5**, 100, doi:10.1038/s41612-022-00325-8.

Tabari, H., and P. Willems, 2023: Global risk assessment of compound hot-dry events in the context of future climate change and socioeconomic factors. *npj Clim. Atmos. Sci.*, **6**, 74, doi:10.1038/s41612-023-00401-7.

Tong, S., X. Y. Wang, G. Fitzgerald, D. McRae, G. Neville, V. Tippett, P. Aitken, and K. Verrall, 2014: Development of health risk-based metrics for defining a heatwave: A time series study in Brisbane, Australia. *BMC Public Health*, **14**, 435, doi:10.1186/1471-2458-14-435.

Wang, C., Z. Li, Y. Chen, L. Ouyang, H. Zhao, J. Zhu, J. Wang, and Y. Zhao, 2024: Characteristic changes in compound drought and heatwave events under climate change. *Atmos. Res.*, **305**, 107440, doi:10.1016/j.atmosres.2024.107440.

Wang, R., G. Lü, L. Ning, L. Yuan, and L. Li, 2021: Likelihood of compound dry and hot extremes increased with stronger dependence during warm seasons. *Atmos. Res.*, **260**, 105692, doi:10.1016/j.atmosres.2021.105692.

Welton, G., 2011: *The Impact of Russia's 2010 Grain Export Ban.* Oxfam Research Reports, 32 pp [Available online at https://www-cdn.oxfam.org/s3fs-public/file_attachments/rr-impact-russias-grain-export-ban-280611-en_3.pdf].

Witte, J. C., A. R. Douglass, A. Da Silva, O. Torres, R. Levy, and B. N. Duncan, 2011: NASA A-Train and Terra observations of the 2010 Russian wildfires. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 9287-9301, doi:10.5194/acp-11-9287-2011.

Yin, J., P. Gentine, L. Slater, L. Gu, Y. Pokhrel, N. Hanasaki, S. Guo, L. Xiong, and W. Schlenker, 2023: Future socio-ecosystem productivity threatened by compound drought–heatwave events. *Nat. Sustain.*, **6**, 259-272, doi:10.1038/s41893-022-01024-1.

Zhang, P., J.-H. Jeong, J.-H. Yoon, H. Kim, S.-Y. S. Wang, H. W. Linderholm, K. Fang, X. Wu, and D. Chen, 2020: Abrupt shift to hotter and drier climate over inner East Asia beyond the tipping point. *Science*, **370**, 1095-1099, doi:10.1126/science.abb3368.

Zhang, Q., D. She, L. Zhang, G. Wang, J. Chen, and Z. Hao, 2022: High sensitivity of compound drought and heatwave events to global warming in the future. *Earth's Future*, **10**, e2022EF002833, doi:10.1029/2022EF002833.

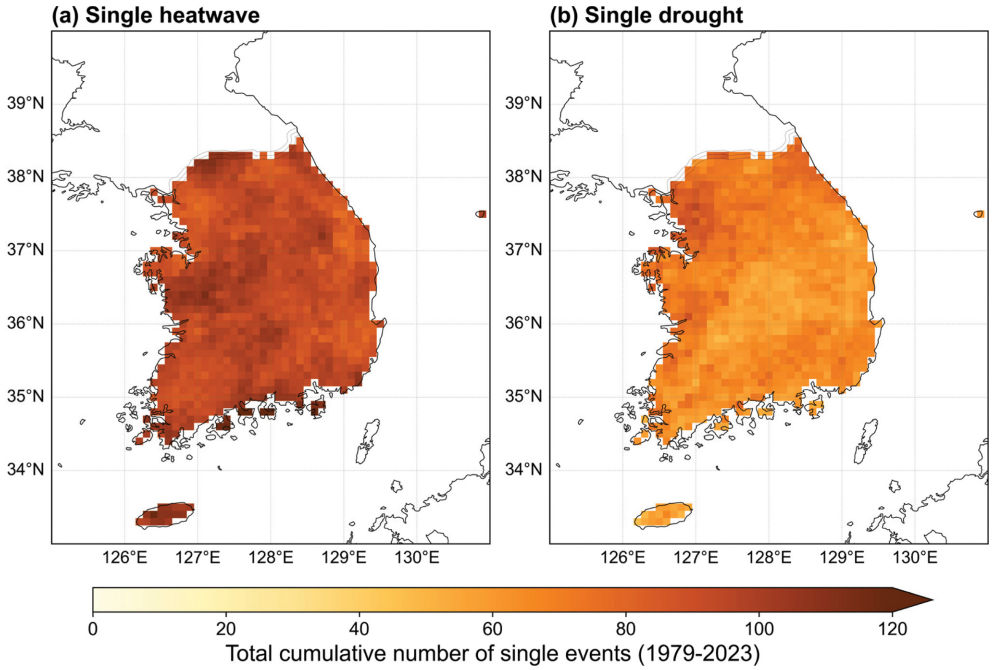
Zhang, X., L. Alexander, G. C. Hegerl, P. Jones, A. K. Tank, T. C. Peterson, B. Trewin, and F. W. Zwiers, 2011: Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change*, **2**, 851-870, doi:10.1002/wcc.147.

Zhang, X., J. Duan, F. Cherubini, and Z. Ma, 2023: A global daily evapotranspiration deficit index dataset for quantifying drought severity from 1979 to 2022. *Sci. Data.*, **10**, 824, doi:10.1038/s41597-023-02756-1.

Zhang, Y., Z. Hao, and Y. Zhang, 2023: Agricultural risk assessment of compound dry and hot events in China. *Agric. Water Manag.*, **277**, 108128, doi:10.1016/j.agwat.2022.108128.

Zhou, Z., L. Zhang, Q. Zhang, C. Hu, G. Wang, D. She, and J. Chen, 2024: Global increase in future compound heat stress-heavy precipitation hazards and associated socio-ecosystem risks. *npj Clim. Atmos. Sci.*, **7**, 33, doi:10.1038/s41612-024-00579-4.

Zscheischler, J., and Coauthors, 2018: Future climate risk from compound events. *Nat. Clim. Chang.*, **8**, 469-477, doi:10.1038/s41558-018-0156-3.



Appendix 1. The spatial pattern of the single event occurrence for 1979~2023. (a) The total cumulative number of the single heatwave events (heatwaves only). (b) Same as (a), but for the single drought events (droughts only).