pISSN 1229-1153 / eISSN 2465-9223 *J. Food Hyg. Saf.*
Vol. 40, No. 3, pp. 183~195 (2025)
https://doi.org/10.13103/JFHS.2025.40.3.183

Journal of Food Hygiene and Safety
Available online at http://www.foodhygiene.or.kr

Review

식품 위해예측 체계의 혁신: 데이터 기반 사전예방 관리의 발전방향

함준혁[1] · 이연정[1] · 나유진[2] · 권소영[3] · 손문기[1] · 김해영[1]*

[1]경희대학교 식품생명공학과
[2]식품안전정보원 정책연구실
[3]제약산업전략연구원

Advancing Toward a Data-Driven Food Risk Prediction System: Strategic Directions for Preventive Risk Management

Jun-Hyeok Ham[1], Yeon-Jung Lee[1], Yu Jin Na[2], Soyoung Gwon[3], Mun-Gi Sohn[1], Hae-Yeong Kim[1]*

[1]*Department of Food Science and Biotechnology, Kyung Hee University, Yongin, Korea*
[2]*Office of Policy Research, National Food Safety Information Service, Seoul, Korea*
[3]*Pharmaceutical Strategy Institute, Seoul, Korea*

(Received April 18, 2025/Revised June 1, 2025/Accepted June 20, 2025)

ABSTRACT - As the climate crisis intensifies, and the global food supply chain becomes increasingly complex, food safety management must shift from reactive responses to science-driven predictive systems capable of anticipating risks and enabling timely interventions. This study critically analyzed the impact of climatic and environmental variables on the emergence and dissemination of foodborne hazards, with a primary focus on biological hazards (bacteria, viruses, and parasites) and natural toxins (mycotoxins and marine biotoxins). Through a comparative assessment of domestic and international data-driven risk prediction systems, we propose strategic directions for the implementation and advancement of the Food Risk Prediction Center. Key policy recommendations include data-driven, risk-based sampling and inspection protocols, and optimized hygiene surveillance based on predicted risk scores, environmentally targeted interventions, climate-scenario-based response frameworks, and international data-sharing networks. This review aims to provide a foundation for strategic transformation toward a scientific, intelligent food safety policy infrastructure and to position the Food Risk Prediction Center as a core platform for proactive national food safety governance.

Keywords: Food Risk Prediction Center, Climate change, Food hazards, Preventive approach, Food safety policy

식품 중 위해요소는 농약이나 동물용의약품과 같이 특정한 목적을 갖고 의도적으로 첨가하거나 투여하는 경우를 제외하면, 대개 본질적으로 가진 생물학적 및 화학적 특성으로 인해 기후 및 주변 환경 요인에 민감하게 반응한다. 이러한 환경적 변수는 위해요소의 생장과 증식 가능성을 좌우하는 핵심 인자로 작용하며, 위해요소와의 상호작용을 통해 활성을 변화시키기 때문에 식품의 안전성에 중대한 영향을 미친다[1)]. 기후 및 환경 요인에 따라 발생률에 크게 영향을 받는 대표적인 식품 위해요소로는 병원성 미생물과 곰팡이독소 등이 있다. 일례로 비브리오패혈증균(*Vibrio vulnificus*)은 해수 온도가 상승하는 8월에서 10월 사이에 발생이 집중되며[2)], 곰팡이 독소인 아플라톡신(aflatoxin)은 고온의 환경, 습도가 급격하게 변하는 조건에서 생성이 촉진되어 장마철 전후 곡류나 견과류의 오염 사례가 자주 보고되었다[3)]. 이러한 사례들은 기후·환경 인자와 식품 위해요소 간의 상관관계가 단순한 이론적 가정에 그치는 것이 아니라 실질적 연관성이 있음을 시사하며, 기후위기라는 현재의 상황 속에서 식품안전 위험의 발생 가능성이 증가하는 동시에, 오히려 기후·환경 인자를 활용해 위해요소의 발생 가능성을 예측할 수 있는 과학적 기회가 도래하고 있음을 의미한다.

최근 인공지능 및 빅데이터 분석 기술의 비약적인 발전

*Correspondence to: Hae-Yeong Kim, Department of Food Science and Biotechnology, Kyung Hee University, Yongin 17104, Korea
Tel: +82-31-201-2123; Fax: +82-31-204-8116
E-mail: hykim@khu.ac.kr

Copyright © The Korean Society of Food Hygiene and Safety. All rights reserved. The Journal of Food Hygiene and Safety is an Open-Access journal distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution,and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

은 과거 독립적이고 무관하게 여겨졌던 데이터 간의 유의미한 상호 연계를 가능하게 하였다. 국내의 중앙부처와 지방자치단체는 기관별 고유한 행정적 목적과 필요성에 따라 기상·기후, 인구통계, 환경오염, 해양생태계 및 국토개발과 관련된 다양한 정보를 수집한다. 이러한 데이터는 본래의 목적 외에도 식품 위해요소의 출현과 확산 가능성을 더욱 정교하게 예측하기 위한 중요한 자원이 될 수 있는데, 기상청의 기후 예측, 환경부의 수질 및 대기오염 정보, 해양수산부의 수온과 염분 농도 데이터 등은 앞서 언급한 병원성 미생물 등의 발생 환경과 밀접한 관련이 있기 때문이다[4]. 따라서 다부처 간 데이터의 유기적 융합과 통합분석은 기존의 사후 대응체계에서 벗어나, 식품 위해요소의 발생 가능성을 선제적으로 예측하고 예방·관리할 수 있는 새로운 패러다임으로의 전환을 이끄는 핵심 기반이 될 것으로 기대되고 있다.

이러한 추세에 맞춰 2024년 9월 6일, 식품 생산부터 소비에 이르는 전 과정에서 위해 관련 데이터를 체계적으로 수집하고 분석하여 예측하는 '식품위해예측센터'의 설립과 운영을 주요 내용으로 한 「식품안전기본법 일부개정법률안」이 국회에 발의되었으며, 국회 본회의를 통과하여 2025년 3월부터 시행될 예정이다. 식품위해예측센터의 설립 목적과 기본적 운영 방향은 개정안에 명시되어 있지만, 센터의 역할을 실질적으로 구현하기 위해 위해예측의 구체적 분석 방법과 결과의 활용 방안에 대한 정립이 필요한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 식품 위해예측 시스템 운영의 필수적인 전제로서 기후·환경적 요인이 식품 안전에 미치는 영향을 종합적으로 분석하여, 식품 위해예측의 구체적인 범위와 대상을 논의하였다. 또한 국내외에서 이미 운영되고 있는 데이터 기반의 위해예측 시스템 사례들을 검토하며, 나아가 식품위해예측센터가 단순한 예측을 넘어 사전예방적 관리체계로의 전환에서 실질적 역할을 수행할 수 있도록 필요한 제도적·정책적 발전방향을 제안하고자 한다.

식품 중 위해요소와 기후·환경적 요인의 상관관계

모든 식품 중 위해요소가 외부의 기후 및 환경적 요인에 유의미하게 영향을 받는 것은 아니므로, 데이터의 통합적 분석을 통해 예측 가능한 위해요소의 범위와 대상을 명확하게 설정하는 것이 중요하다. 식품 중 위해요소는 일반적으로 그 특성과 발생 원인에 따라 생물학적 위해요소(biological hazards)와 화학적 위해요소(chemical hazards)로 구분된다. 생물학적 위해요소에는 세균, 바이러스, 기생충 등이 포함되며, 이들은 기본적으로 생육과 증식 과정에서 적절한 온도, 습도 및 수분 활성도와 같은 환경조건이 필수적이기 때문에 기후·환경적 변수에 민감하게 반응할 가능성이 높다(Fig. 1). 반면, 화학적 위해요소에는 농약, 중금속, 동물용 의약품 등이 포함되는데, 이러한 물질들은 대개 인위적 사용이나 산업 활동을 통해 식품으로 유입되므로 외부 기후·환경적 요인에 의한 오염 수준 변화가 상대적으로 적다. 그러나 화학적 위해요소 중에서도 해양생물독소 및 곰팡이독소와 같은 천연 독소의 경우, 특정 생물체에서 생성되며 이들의 생성 및 축적 과정이 기후·환경 조건과 밀접한 연관성을 가지기 때문에 환경 변수의 영향을 크게 받는다.

물론 생물학적 위해요소와 천연 독소가 식품 위해예측 체계에서 고려할 수 있는 전부는 아니지만, 현재까지 축적된 과학적 연구와 국내외 부적합 자료 등을 종합적으로 검토했을 때 이들 위해요소의 예측 가능성 및 관리 우선순위가 높은 것으로 판단된다(Table 1). 이에 비해 농약 및

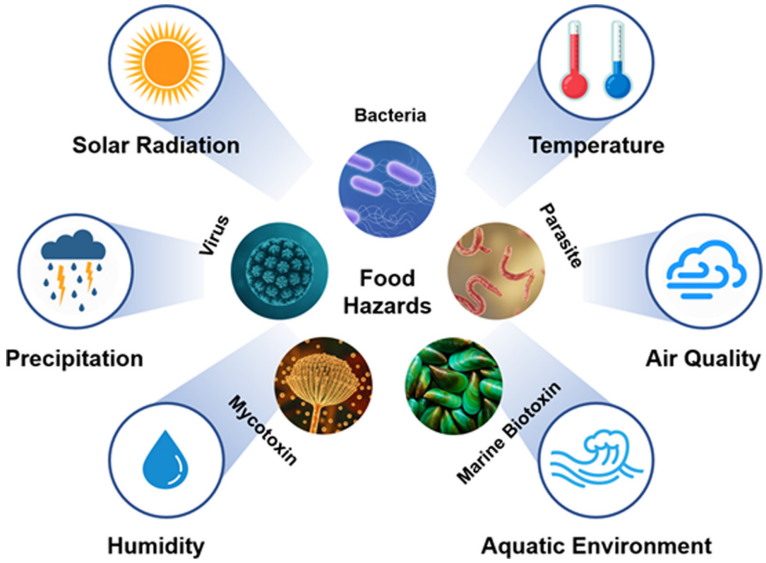

Fig 1. Climatic and environmental drivers associated with the emergence of food hazards.

Table 1. Climate and environmental factors associated with the emergence of food hazards

Category	Hazard and Prioritization	Climatic and Environmental Factors	References
Bacteria	*Campylobacter* spp. (Priority 2**)	- Temperature (maximum, minimum, average) - Precipitation (daily amount, cumulative amount) - Flooding (frequency within watershed, duration of inundation) - Humidity (average relative humidity, maximum, minimum) - Contaminated wastewater (BOD, COD, TSS)[1)]	37) 38) 39) 40) 41)
	Salmonella spp. (Priority 2)	- Temperature (maximum, minimum, average) - Precipitation (daily amount, cumulative amount) - Flooding (frequency within watershed, duration of inundation) - Humidity (average relative humidity, maximum, minimum) - Air quality (particulate matter concentration) - Irrigation water quality (BOD, COD) - Livestock-related pollution (fecal discharge volume, density of livestock facilities)	42) 43) 44) 45)
	Vibrio spp. (Priority 1*)	- Temperature (maximum, minimum, average) - Precipitation (daily amount, cumulative amount) - Humidity (average relative humidity, maximum, minimum) - Aquatic environment (water temperature, salinity of water bodies)	46) 47) 48) 49) 50) 51) 52)
	Listeria monocytogenes (Priority 2)	- Temperature (maximum, minimum, average) - Precipitation (daily amount, cumulative amount) - Humidity (average relative humidity, maximum, minimum) - Soil conditions (soil moisture content, organic matter content, contamination level) - Livestock-related pollution (livestock manure discharge) - Sewage inflow environment (domestic and industrial wastewater inflow)	53) 54) 55) 56) 57) 58) 59)
	Yersinia enterocolitica (Priority 2)	- Temperature (maximum, minimum, average) - Farm-level environmental factors (livestock manure load, hygiene conditions of animal housing)	60) 61)
	Brucella spp. (Priority 2)	- Temperature (maximum, minimum, average) - Humidity (average relative humidity, maximum, minimum) - Air quality (particulate matter concentration) - Light environment (sunshine duration, solar radiation)	62) 63)
	Pathogenic *E. coli* (Priority 2)	- Temperature (maximum, minimum, average) - Meteorological and atmospheric factors (average wind speed) - Soil characteristics (soil moisture content, contamination level, pH) - Livestock-related contamination (manure output, livestock housing density)	64) 65) 66) 67) 68)
	Shigella spp. (Priority 2)	- Temperature (maximum, minimum, average) - Precipitation (daily amount, cumulative amount) - Humidity (average relative humidity, maximum, minimum)	69) 70) 71)
Viruses	Norovirus (Priority 2)	- Temperature (maximum, minimum, average) - Precipitation (daily amount, cumulative amount) - Humidity (average relative humidity, maximum, minimum)	72) 73)
	Rotavirus (Priority 3***)	- Temperature (maximum, minimum, average) - Aquatic environment (water temperature, streamflow velocity, reservoir size)	74) 75) 76)
	Hepatitis A virus (Priority 3)	- Temperature (maximum, minimum, average) - Precipitation (daily amount, cumulative amount) - Humidity (average relative humidity, maximum, minimum) - Aquatic environment (sea level)	77) 78) 79)
Parasites	Cryptosporadia (Priority 3)	- Precipitation (daily amount, cumulative amount) - Humidity (average relative humidity, maximum, minimum) - Extreme weather events (heavy rainfall, heatwaves, droughts)	80) 81) 82) 83)

Table 1. (Continued) Climate and environmental factors associated with the emergence of food hazards

Category	Hazard and Prioritization	Climatic and Environmental Factors	References
Mycotoxins	Aflatoxin (Priority 1)	- Temperature (maximum, minimum, average) - Precipitation (daily amount, cumulative amount) - Drought conditions (frequency of drought events, number of dry days) - Humidity (average relative humidity, maximum, minimum)	84) 85) 86)
	Ochratoxin (Priority 1)	- Temperature (maximum, minimum, average) - Precipitation (daily amount, cumulative amount) - Humidity (average relative humidity, maximum, minimum)	87)
	Deoxynivalenol (Priority 1)	- Precipitation (daily amount, cumulative amount) - Humidity (average relative humidity, maximum, minimum) - Meteorological and atmospheric factors (mean wind speed) - Geographical factors (pathogen accumulation potential in isolated regions)	88) 89) 90)
Marine biotoxins	Saxitoxin, domoic acid, okadaic acid, ciguatoxin, tetrodotoxin (Priority 1)	- Temperature (maximum, minimum, average) - Aquatic environment (water temperature, salinity, nutrient levels) - Biological contamination (harmful algal blooms)	91) 92) 93) 94)

* **Priority 1** indicates hazards with high sensitivity to climatic and environmental variables, strong seasonal patterns, and well-established scientific evidence for predictive modeling. These hazards are considered the most urgent targets for the initial development of risk prediction systems.

** **Priority 2** includes hazards with moderate environmental responsiveness and known seasonal trends, but whose occurrence is also significantly influenced by human hygiene practices and food handling conditions. These require tailored prediction models integrating both environmental and behavioral variables.

*** **Priority 3** represents hazards with relatively weak or complex correlations with environmental factors, or those whose occurrence patterns are highly dependent on multiple indirect or region-specific conditions. Predictive modeling for these hazards may require further foundational research and long-term data accumulation.

[1)] BOD, Biochemical oxygen deman; COD, Chemical oxygen demand; TSS, Total suspended solids.

동물용의약품과 같은 화학적 위해요소는 기후·환경 데이터와의 직접적인 상관성이 상대적으로 낮아서, 이들의 발생 가능성 예측은 부적합률, 사용량, 생산 및 판매량 등의 다른 유형의 데이터를 활용한 별도의 분석적 접근이 요구된다. 따라서 본 절에서는 기후·환경적 변수와의 상관관계가 명확하여 우선순위가 높다고 판단되는 생물학적 위해요소와 천연 독소를 중심으로, 이들의 특성 및 발생 조건에 대해 구체적으로 분석하고자 한다.

세균

기온과 습도 등 기후적 변수는 세균성 식중독 발생과 깊은 상관성을 가지며, 특히 여름철과 같은 고온의 시기에 식중독 사례가 증가하는 계절적 경향성을 뚜렷이 나타낸다. 대표적인 식중독균인 *Salmonella* spp.는 35-37°C에서 최적의 생육 조건을 보이며, 15°C 이하의 저온 환경에서는 생장이 현저하게 억제되었다[5)]. 외부 기온 상승과 살모넬라증 발생 간의 유의미한 상관성은 여러 연구를 통해 입증되었는데, 주간 평균 기온이 1°C 상승할 경우 살모넬라증이 주간 발생 건수가 5.8-8.8% 증가할 수 있는 것으로 보고되었다[6)]. 또한 상대습도와 강우량의 증가 역시 살모넬라증 발생과 정량적 연관성을 보이며, 습도가 높고 강우가 집중되는 기간에 특히 높은 발생률을 나타내었다[7)].

강수량 및 수질 변화는 병원성 세균의 환경적 전파를 촉진하여 식품 오염 위험을 증가시키는 주요 인자이다. 장마 및 폭우 등으로 인한 홍수 발생 시 가축 분뇨나 생활하수의 범람이 발생하여 지하수와 관개수, 나아가 채소밭 등의 환경을 광범위하게 오염시키며, 이는 직접적으로 식품을 통한 병원성 세균 감염 위험을 높인다[8)]. 일례로 *Campylobacter* spp. 감염 사례는 홍수나 폭우 직후 급격히 증가하는 경향이 있는데, 이는 분변 오염이 강수에 의해 하천 및 지표수로 유입되어 식수원 및 농작물을 오염시키기 때문으로 분석되었다[9,10)]. 반대로 지속적인 가뭄 조건에서는 용수 부족으로 인해 비위생적이고 오염된 물이 관개용수로 사용될 가능성이 높아져 병원성 세균 오염을 가중시킬 수 있다[11)].

해양 및 수생 환경에서도 기후 변화는 병원성 세균의 분포와 증식에 직접적인 영향을 미친다. *Vibrio cholerae* 및 *Vibrio parahaemolyticus*를 포함한 *Vibrio* spp.는 해수 온도의 상승 및 연안 수역의 염분 농도 변화에 따라 서식 영역이 확장되고 오염 가능성이 증가한다[5)]. *Vibrio* spp.는 일반적으로 12°C 이상의 따뜻한 수온과 저염분 내지 중염분(1-25 g/L) 환경에서 최적의 증식 조건을 가지며, 최근의 기후 변화로 인한 해수 온도 상승과 폭염 빈도의 증가는 기존에 발병 빈도가 낮았던 지역에서도 비브리오균 관련 식중독 사례가 증가할 것으로 판단된다[12)].

세균성 식중독 위험을 기후 데이터와 연계하여 예측하

는 접근법은 이미 여러 연구에서 시도된 바 있다. 예를 들어, 기온 변화와 식중독 발생 사이의 통계적 관계를 이용한 조기경보 시스템이 개발되었으며[13], 해수 온도 및 염분농도 모니터링을 통해 비브리오균 오염 위험이 높은 시기를 사전에 예측하여 식품 소비자에게 주의를 환기시키는 시스템도 구축되어 운영되고 있다[14]. 그러나 세균성 식중독의 발생과 확산은 기온이나 강수량 외에도 식품 취급과 보관의 위생 관리 상태 및 냉장 유통과 같은 인간적 요인에 의해 상당히 영향을 받으므로, 기후 및 환경 데이터 기반의 위해예측 시스템 구축 시 이러한 복합적인 변수들을 종합적으로 고려하는 통합적 접근이 요구된다.

바이러스

식품매개 바이러스는 세균과 달리 환경에서 독자적으로 증식하지 않으나, 기후 및 환경 조건의 변화에 따라 전파 및 감염 양상에 상당한 영향을 받을 수 있다. 대표적인 식품매개 바이러스인 노로바이러스와 로타바이러스는 주로 인간 및 동물의 분변으로 배출되어 식품 및 수자원을 오염시키며, 기온과 습도는 바이러스 입자의 생존과 전파 가능성을 결정짓는 중요한 환경 요인으로 작용한다. 일반적으로 낮은 온도 조건에서 바이러스 입자는 환경 내에서 더 오래 생존 가능하며, 이러한 특성은 겨울철 바이러스성 식중독 발생 빈도가 증가하는 주된 이유로 제시된다. 실제로 다양한 연구에서 수온 저하가 노로바이러스 감염 사례의 증가와 통계적으로 유의미한 상관관계를 가지고 있음을 입증하였다[15,16]. 습도 역시 바이러스의 환경 내 생존과 전파 효율을 좌우하는 핵심 인자 중 하나로 알려져 있다. 예컨대, 로타바이러스는 높은 상대습도 조건에서 생존력과 감염성이 장기간 유지된다는 보고가 있다[17]. 강수량의 급격한 변화, 특히 폭우로 인한 하수도 범람은 하천이나 연안으로의 분변성 바이러스 유입을 초래하며, 주변 어패류 양식장이나 농경지가 바이러스에 오염되는 사례가 빈번히 보고된다.

특히 노로바이러스의 경우, 기상학적 요인 외에도 인구 및 환경적 조건과의 복합적 상호작용을 통해 발생률이 좌우된다. 예를 들어 공공하수처리장 및 분뇨처리시설과 같은 환경기초시설의 처리 능력과 위치, 하수처리가 미비한 지역의 인구 비율 및 밀집도는 노로바이러스의 발생과 검출률을 증가시키는 잠재적 변수로 작용한다. 이는 강수량 변화와 연계되어 하수의 범람과 같은 상황에서 굴을 비롯한 어패류 등 수산물의 오염 가능성을 크게 높이는 메커니즘과 연결된다.

그럼에도 바이러스성 식품 위해요소의 예측은 계절성이 명확히 드러나는 일부 바이러스를 제외하면, 기후 변수만으로 설명하기 어려운 복합적인 양상을 보인다[18]. 바이러스의 생존 및 전파가 식품의 위생적 취급 여부와 주변 위생시설, 환경기초시설의 정비 상태, 인구 밀집도와 같은 사회적·환경적 요인의 영향을 광범위하게 받기 때문이다. 따라서 향후의 바이러스 위해 예측 시스템은 단순히 기상·기후 조건뿐 아니라 강우량 및 하수 처리시설의 모니터링 현황, 지역별 위생 관리 상태 등 인간 활동과 관련된 복합적 인자들을 포함하는 다차원적인 접근 방식이 필요하다.

기생충

국내에서는 어패류나 육류를 생식 형태로 섭취하는 비율이 높은 편이므로, 식품매개 기생충 감염의 위험성이 상대적으로 크다. 이러한 상황에서 기후 및 환경 조건의 변화는 기생충의 숙주가 되는 동물과 식물의 서식 범위와 생태계를 변화시켜, 기존의 관리체계가 고려하지 못했던 새로운 경로를 통한 기생충 감염 가능성을 높이고 있다. 특히 강우 패턴의 변화는 기생충의 환경적 전파 위험을 크게 증가시키는 요인으로 지목된다. 폭우 시 발생하는 지하수 및 지표수의 분변성 오염은 *Cryptosporidium*의 난포자(oocyst)와 Giardia의 낭(cyst)을 하천 및 저수지로 유출시키고, 이로 인해 상수원수 및 관개용수가 오염될 수 있다. 실제로 독일에서는 2013년 기록적인 폭우로 인한 홍수 이후 상수도 시스템이 *Cryptosporidium*에 오염되어 167명의 집단 감염 사례가 보고되었는데[19], 이는 기후 이변과 기상 재해가 식품매개 기생충증의 발생과 직접적으로 연관될 수 있음을 시사한다.

온도 상승 또한 특정 기생충의 생태학적 특성에 상당한 영향을 미친다. 기후 온난화는 말라리아나 주혈흡충과 같은 열대 및 아열대 기생충의 지리적 분포 범위를 북쪽으로 확대시킬 가능성을 높이고 있다. 이는 주로 매개체 모기의 서식 범위 확장이나 중간 숙주인 달팽이류의 활동기간이 증가하는 형태로 나타나며, 결과적으로 식품 및 물을 통해 감염될 수 있는 기생충의 국내 유입 위험을 높이고 있다[20]. 또한, 온도 상승은 기생충의 생리적 대사율을 증가시켜 번식 속도를 가속화하고 개체군 밀도를 높이는 데 기여하는 것으로 보고되었다[5].

기생충의 전파 및 감염 양상은 숙주, 병원체 및 환경 요소 간의 복합적이고 동적인 상호작용에 따라 결정되기 때문에 기후 변화에 따른 기생충 위해의 예측은 상당한 불확실성을 내포한다. 기생충 감염은 다양한 숙주와 환경 조건에 따라 적응력이 다르게 나타날 수 있고, 일부 기생충은 적합한 숙주나 환경 조건이 부재할 경우 생존하기 어렵다. 그러나 대부분의 기생충은 각자의 생존 메커니즘을 통해 지속적인 환경 적응력을 가지므로, 이를 효과적으로 예측하고 관리하기 위한 연구가 필수적이다. 따라서 앞으로는 다양한 기후 시나리오에 따라 기생충의 감염 위험도를 장기적으로 추적하고 평가할 수 있는 예측 모델을 개발하고, 이를 위해 폭넓은 환경 모니터링 데이터의 축적과 분석이 필요하다.

곰팡이독소

곰팡이독소는 곰팡이류의 2차 대사산물로서 곡류, 견과류, 과일류 등 다양한 농산물에 오염되어 인체 건강에 심각한 위해를 초래할 수 있다. 이러한 독소의 생성 및 확산은 주로 기후 조건의 영향을 강하게 받으며, 주요 인자로는 온도, 습도(수분 활성도), 강수량 및 극단적인 기상 이변이 알려져 있다[21]. 일반적으로 *Aspergillus* spp.는 고온건조한 환경에서 최적의 번식 조건을 가지며, *Fusarium* spp.는 상대적으로 선선하고 습한 환경에서 잘 번식하여 아플라톡신(aflatoxin), 데옥시니발레놀(deoxynivalenol), 오크라톡신(ochratoxin) 등 다양한 독소를 생산한다[22,23]. 최근 기후변화로 인해 평균 기온이 상승하고 가뭄과 폭우가 번갈아 나타나는 불규칙한 기상 패턴이 빈번히 발생하고 있는데, 이러한 변화는 작물과 곰팡이 간의 스트레스 환경을 변화시켜 곰팡이독소의 생성 양상을 더욱 복잡하게 만들고 있다. 특히 고온과 가뭄 상태가 지속되다가 갑자기 많은 양의 강우가 발생할 경우, 식물에 극도의 스트레스가 가해져 병원균에 대한 감수성을 증가시키며 *Aspergillus* spp.의 침입과 아플라톡신 생성이 촉진될 수 있다. 반면 습도가 높은 우기에는 *Fusarium* spp.에 의한 곡물의 이삭 부패가 빈번히 나타나 데옥시니발레놀과 같은 독소 함량이 증가할 가능성이 높다. 이처럼 기후변화로 인한 극단적인 가뭄과 강우의 교차와 평균 온도의 상승은 농작물 재배 환경을 변화시켜 곰팡이 감염과 독소 생성의 복합적 위험성을 높이고 있다.

곰팡이독소의 형성은 곰팡이와 식물 숙주 간의 상호작용, 재배 시기의 기상 조건, 작물의 품종 및 재배법과 같은 여러 요소의 결과물이다. 따라서 기후변화가 곰팡이독소 오염에 미치는 영향을 정량적으로 예측하려면 다량의 데이터와 정교한 분석이 필요하다. 이러한 복잡성으로 인해 학계에서는 기상 자료와 곰팡이독소 발생 기록을 활용한 통계 기반 예측 모델, 작물 생육 모델에 곰팡이 생리반응을 결합한 프로세스 기반 모델 등 다양한 접근을 통해 위해 예측 모델 개발을 시도하였다[24]. 또한, 일부 연구에서는 기후변화 시나리오를 활용하여 옥수수의 미래 아플라톡신 오염도를 예측하였으며, 온난화로 인해 독소 오염 위험이 증가할 가능성이 높은 지역을 확인하였다[25].

현재의 곰팡이독소 예측 모델들은 특정 작물이나 일부 곰팡이에 제한되어 있거나, 다양한 기후 변수를 모두 고려하지 못해 정확성이 떨어진다는 한계를 갖고 있다[26]. 그럼에도 기후 정보를 기반으로 하는 곰팡이독소 조기경보 시스템의 필요성은 지속적으로 증가하고 있으므로, 위험 예측을 통해 수확 시기 조정이나 내병성 품종으로의 전환과 같은 예방적 조치를 취할 수 있는 체계적 관리 시스템 구축이 필수적이다.

해양생물독소

해양생물독소는 유독성 플랑크톤이나 해양 미생물이 생성하여 어패류에 축적되는 자연 독소로, 오염된 수산물 섭취를 통해 인체에 중독을 유발할 수 있다. 지난 수십 년간 전 세계 바다 표면 수온은 지속적으로 상승하고 있으며, 해양의 이산화탄소 흡수로 인한 산성화, 지역에 따른 염분 변화, 해류 패턴 변화 등이 관측되고 있다[26]. 해양 환경의 급격한 변화는 독소 생산 생물의 발생 빈도와 분포 지역에 상당한 영향을 미쳐, 해산물 소비와 관련된 독성 위험도를 증가시키고 있다. 특히, 이러한 물리·화학적 변화는 해양 생태계의 식물플랑크톤 군집 구조에 변화를 일으켜, 유해 조류 대발생(harmful algal blooms, HABs)의 빈도와 지리적 확산을 촉진한다[27]. 유해 조류는 영양염 풍부, 수온 상승, 수층 안정화 등의 조건에서 개체수가 폭발적으로 증가하며 독소를 생성하는데, 기후변화로 이러한 조건이 충족되는 사례가 발생하는 것이다. 이외에도 연안 지역의 수온 상승과 강우 증가로 인한 담수 유입이 증가하면서, 기존에는 나타나지 않던 온대 및 기수역 플랑크톤 종들이 새로운 해역에서 증식하여 독소를 생산하는 사례가 빈번하게 보고되고 있다. 실제로 따뜻한 바다에서 주로 분포하던 플랑크톤 종들이 점차 고위도로 확장되어, 기존에 독소 문제가 없던 위도에서 패류 독소 중독 사례가 보고되는 등 분포 변화가 나타나는 것이다.

해양생물독소에는 saxitoxin, domoic acid, okadaic acid 등이 있으며, 이들은 각각 마비성 패류독, 기억상실성 조개중독, 설사성 패류독과 같은 심각한 임상증상을 유발한다. 이러한 독소는 일반적으로 식물플랑크톤이 생산하지만, 최종적으로는 어패류나 플랑크톤을 먹이로 하는 어류의 체내에 축적되어 식품으로서 인간에게 노출된다. 패류 자체는 독소의 영향을 거의 받지 않지만, 사람이 섭취할 경우 심각한 위험을 초래할 수 있으며, 이러한 독소는 맛과 냄새로 식별되지 않고, 일반적인 조리법으로도 분해되지 않는다는 점에서 관리의 중요성이 더욱 강조된다.

이에 따라 전 세계 여러 연안 국가들은 해양생물독소 위험을 관리하기 위한 모니터링과 예측 시스템 구축에 주력하고 있다. 많은 국가에서 주기적인 플랑크톤 및 독소 모니터링을 통해 독소 수치가 기준치를 초과할 경우 해당 해역의 패류 채취를 금지하거나 제품의 출하를 중지하는 조치를 시행하고 있다. 그러나 기후 변화로 인해 새로운 독소 생성 생물의 출현이나 계절성 변화가 발생할 수 있으므로 기존의 모니터링 방식만으로는 한계가 있다. 이에 환경조건 기반의 예측 모델 개발과 활용이 필수적인 보완책으로 떠오르고 있으며, 미국과 유럽에서는 위성 원격탐사 기술을 활용하여 해수 표면 온도와 적조 현상을 조기 감시하고, 해양 기상 예보와 연계한 유해 조류 발생 경보 시스템을 구축한 사례가 있다. 이처럼 해양생물독소 위험은 환경 지표의 실시간 모니터링과 정확한 예측을 통해 효과적으로 관리 가능한 위해요소로 평가되며, 앞으로 모델의 정확성과 신뢰성을 높이기 위해 다양한 기후 시나리오에 따른 장기적인 모니터링 데이터의 축적과 연구가 시급하다.

국내외 식품 위해예측 데이터 활용 사례 분석

최근 기후변화에 따른 재난·재해 예측과 피해 예방을 위한 데이터 기반 대응의 중요성이 강조되면서, 국내외적으로 기후·환경 데이터를 활용한 위해예측 시스템이 활발히 개발·운영되고 있다. 이러한 시스템은 기상 정보, 환경오염 수준, 인구통계 등 이질적인 데이터를 통합 분석함으로써 위해의 발생 가능성을 사전에 예측하고, 선제적 관리 전략 수립에 기여한다. 예측시스템 구축에 필요한 기상·환경 관련 데이터는 기상청, 환경부, 해양수산부 등 여러 부처에서 수집되어 「공공데이터의 제공 및 이용 활성화에 관한 법률」에 따라 공공데이터포털(data.go.kr)을 통해 공개된다. 이러한 데이터는 식품 위해예측에 핵심적인 기온, 강수량, 습도, 해수온, 일사량, 운량, 염도, 일조 시간 등 기상환경 지표를 포함하고 있어, 향후 식품 위해예측의 실효성 있는 운영과 과학적 시스템 구축에 있어 중요한 자원으로 기능할 것으로 기대된다.

국내 위해예측 데이터 활용 사례

국내에서는 식품 및 생산단계 농축수산물의 안전성과 생산성 확보를 위해 다양한 위해예측 시스템이 구축되어 운영되고 있다. 비브리오패혈증균 예측시스템은 해수 온도, 염분 등 실시간 해양환경 데이터와 과거 검출 정보를 기반으로 해역별 비브리오균 발생 가능성을 예측·예보하는 플랫폼으로, 사전 예방 중심의 수산물 안전관리를 지원한다[14]. 농업날씨 365 시스템은 농업 기상 관측 데이터를 지역별, 지대별, 작물별로 세분화하여 제공하며, 생장도일, 온량지수, 기후생산력지수와 같은 농업현장 맞춤형 정보를 통해 기후변화에 따른 작물 재배 위험을 체계적으로 관리할 수 있도록 지원한다[28]. 농업기상재해조기경보시스템은 이상기상 현상을 사전에 감지하여 Geographic Information System (GIS)와 모바일을 통해 농장별 상세한 날씨 정보를 제공하고, 생육단계별 가뭄, 일조부족, 냉해 등에 대한 재해 대비 지침을 제시함으로써 농가의 신속하고 효율적인 대응력을 높이고 있다[29].

국가농작물병해충관리시스템에서 제공하는 병해충예측지도는 논벼, 감자, 과수 등 주요 작물의 병해충 발생 위험을 GIS 기반으로 예측하고, 농업인들에게 실시간 예측 결과를 제공하며, 작목별 병해충 예측 모델을 통해 감염 위험성과 방제 필요성을 수치화하여 방제 결정을 지원한다[30]. 가축사육기상정보시스템은 기상청의 온습도 데이터를 활용하여 가축이 경험하는 더위 스트레스 지수를 실시간으로 예측하고, 이를 지역 및 축종별로 세분화하여 가축 사양 관리 지침과 함께 제공한다[31]. 물환경정보시스템의 물환경지리정보서비스는 원격모니터링 기술을 활용하여 하천 및 광역수체의 조류 농도를 시각화하고 유해남조류세포수의 농도를 분석하여 수질오염 가능성을 조기에 경고한다[32]. 이러한 시스템들은 향후 식품 위해예측을 위한 분석체계와 연계·운영됨으로써, 선제적 식품안전관리 전략을 수립하는 데 핵심적 역할을 수행할 것으로 판단된다.

제외국 위해예측 데이터 활용 사례

제외국에서는 기후변화에 따른 식품 위해요소의 동태를 과학적으로 이해하고, 국가 차원의 예방 전략 수립을 지원하기 위한 예측체계를 정교하게 발전시키고 있다. 미국 농무부의 Pathogen Modeling Program (PMP)은 기온, pH, 염도, 수분활성도 등 환경 요인을 기반으로 병원성 세균의 성장, 생존 및 불활성화를 정량적으로 예측할 수 있는 모델을 제공한다[33]. 특히 PMP는 다양한 병원체와 식품 환경을 반영한 정적·동적 모델을 통해 조건별 위해 가능성을 정량화함으로써, 식품안전관리 전략 수립의 정밀성과 신뢰성을 높이는 데 기여한다. 유럽 질병예방통제센터의 Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA) 시스템은 기후 변화로 인한 병원체의 환경적 확산과 인체 감염 위험을 정량화하는 모델로서, 비브리오균 등의 위해도를 시나리오 기반으로 정밀하게 평가하고 있다. 이 모델은 강우량, 해수온 변화, 염도 등의 복합적인 환경 변수 데이터를 활용하여 발생 가능성을 예측한다[34]. EUROHAB 프로젝트는 위성 데이터를 기반으로 HAB의 발생 및 확산을 모니터링하고 조기에 경보하는 시스템이다[35]. 해당 프로젝트는 Sentinel-3 위성을 통해 제공되는 실시간 데이터를 바탕으로 기존 모니터링 방식보다 비용효율적으로 광범위한 지역을 감시할 수 있으며, 어업 및 해양산업의 대응 능력을 획기적으로 높이고 있다. EUROCIGUA 프로젝트는 유럽 내 시구아테라 독소에 의한 식중독의 위험 평가를 목표로, 미세조류의 독소 생성 및 어류 내 축적 현황을 분석한다[36]. 이는 유럽 전역에서 수집된 환경 및 역학 데이터를 통해 독소의 지역적 분포 및 독성 특성을 규명하고, 위험 지역을 사전에 식별함으로써 예방적 관리 전략 수립을 지원한다.

식품 위해예측 기반 예방체계 구축을 위한 정책적·제도적 발전방안 제안

증가하는 식품 내 위해요소의 발생 가능성을 효과적으로 감시하기 위한 국가적 자원은 제한적이며, 현재의 인력과 검사체계만으로는 농축수산물을 포함한 모든 식품에 대해 동일한 수준의 안전을 확보하는 데 한계가 있다. 이러한 맥락에서, 데이터에 기반한 식품 위해예측 시스템은 자원의 효율적 배분과 예방적 관리 전략 수립을 가능하게 할 수단으로 부각된다. 센터의 실질적 운영이 본격화되는 현 시점은, 위해예측 정보를 안전관리 정책에 연계하고 제도화하기 위한 실행 기반을 구체화해야 할 시기로 판단된다. 따라서 본 절에서는 예방적 관리체계 실현을 위한 식품 위해예측센터의 정책적·제도적 역할과 발전방안을 제안하고자 한다.

위해예측 기반 수거·검사 등 안전관리 계획 수립

식품안전관리는 지역별 생산 품목의 특성, 위해요소 발생 가능성, 소비 양상 등의 이질성을 고려하지 않으면 효율성을 확보하기 어렵다. 그럼에도 일률적인 수거·검사 계획이 운영될 경우, 오히려 위해요소 발생 가능성이 낮은 품목에 행정력이 집중되고, 실질적 위해 우려가 높은 품목은 관리 사각지대에 놓일 위험이 있다. 따라서 지역별 생산량, 위해이력, 기상 조건 등 데이터를 종합하여 고위험 품목 및 시기를 선별하고, 이를 중심으로 검사 자원을 집중 배분하는 정밀한 안전관리 전략이 요구된다. 예를 들어, 곰팡이독소 발생 이력이 높은 곡물 산지의 경우 장마철 강수량과 온습도 예측 정보를 기반으로 집중관리 계획을 수립하고, 해안지역 지자체는 해수 온도 및 염분 농도 예보와 결합하여 패류독소 집중 검사 시기를 사전에 조정하는 방식이 될 수 있다. 이 같은 지역 맞춤형 계획은 중앙정부의 식품안전관리 기본계획과 정합성을 유지하되, 지자체와 지방청이 실질적 실행 주체로서 기능할 수 있도록 세부 전략으로 구체화되어야 한다. 특히, 식품위해예측센터는 지역별 위해요소 예측지도 및 정량 데이터 기반 분석자료를 정기적으로 제공하는 역할을 수행하고, 이를 바탕으로 지자체가 연례 식품안전 시행계획을 수립·실행하도록 제도화한다면, 국가 전체의 식품안전 수준 향상과 지역 간 형평성 제고에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

효율적 위생감시체계 구축

증가하는 식품취급업소 수와 제한된 규제인력의 현실 속에서 위생감시의 효율성과 타당성을 동시에 확보하기 위해서는 위해예측 정보를 활용한 리스크 기반의 접근방식이 필요하다. 이를 위해 업소별 과거 행정처분 이력, 취급품목의 위해도, 기후 예측 정보 등을 종합하여 업소 단위의 위험도를 정량화하고, 그 결과에 따라 감독 자원을 차등 배분하는 전략이 효과적일 것으로 판단된다. 예컨대, 위해도 점수가 높은 식품 제조·유통업체는 현장 점검 주기를 단축하고 정기적인 현장 점검을 강화하며, 반대로 저위험 업소는 비대면 점검이나 자체점검 방식으로 전환함으로써 행정자원의 효율적 활용이 가능하다. 또한, 식중독 다발 지역의 학교급식소 등은 계절적·지역적 위험도를 반영한 예측모델을 기반으로 집중 점검 대상에 우선 배정하는 방식이 효과적일 것이다.

구체적 예시로써는 위생감시 대상 업소 선정에 있어 (1) 과거 위생법규 위반 횟수 및 행정처분 이력, (2) 취급 식품의 기후환경 민감성(곰팡이독소 및 해양독소 관련 농수산물, 계절적 식중독 발생 식품 등), (3) 지역별 기후환경 예측 위험지표(온도, 습도, 강수량 등), (4) 업소의 위생시설 수준(냉장·냉동 설비, HACCP 적용 여부 등) 항목들을 바탕으로 취급업소별 정량적 점수(1-100점)를 산출하고, 이를 기준으로 다음과 같이 점수대를 분류하여 관리 우선순위를 차등화하는 방식이 접목될 수 있다. 고위험군(80-100점)은 월 1회 이상의 현장 방문 점검과 샘플링 검사가 필수적으로 수행하고, 중위험군(50-79점)은 분기별 현장 점검 및 샘플링 검사를 통해 관리를 수행하는 방식이 예시가 될 수 있다. 반면, 저위험군(1-49점)은 연 1회의 비대면 점검 또는 자체 점검 보고서 제출을 통해 간접적으로 관리를 수행하는 방식이 가능할 것으로 판단된다. 이와 같은 정량 기반의 차등 관리 전략은 행정 자원의 효율적 활용뿐 아니라, 고위험 업소에 대한 집중적인 위생감시를 가능하게 하여 식품 관리 수준의 실질적 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

실제로 수입식품 통관 단계에서는 이미 AI 기반의 예측모델을 활용하여 부적합 가능성이 높은 품목을 선별하고 무작위 검사를 효율적으로 수행하고 있으며, 이러한 위험기반 접근 방식은 국내 유통 식품 및 식품접객업소에 대해서도 충분히 적용 가능할 것으로 보여진다. 이러한 예측 기반의 위생감시를 통해 한정된 자원으로도 고위험 업소에 대한 집중 관리가 가능한 스마트 위생감시체계로의 전환이 가능할 것으로 판단된다.

데이터 기반 환경 및 시설기반 개선

위해요소가 반복적으로 발생하는 지역이나 환경에 대해서는 단순 모니터링이나 검사 강화만으로는 근본적인 위해 저감 효과를 기대하기 어렵다. 따라서 위해예측 정보를 바탕으로 환경 인프라에 대한 구조적 개선이 병행되어야 한다. 예를 들어, 굴에서 노로바이러스가 지속 검출되는 연안 지역의 경우, 문제의 핵심은 미처리 하수 유입으로 인한 해양오염에 있을 수 있으므로, 해양수산부 및 환경부와의 협력을 통해 하수처리시설 증설, 유입 하천 정화, 분뇨 관리 강화 등의 조치가 요구된다. 이와 함께 양식장 인근 수질 개선을 위해 살균장비 지원, 배출수 관리, 수질 모니터링 강화 등도 포함되어야 한다. 또한 내수면 양식장이나 농산물 재배지에 대해서도 지하수 오염, 비료·농약 유출 등 환경오염원을 차단하는 지역 환경개선사업이 위해요소 저감에 효과적일 것으로 판단된다. 이처럼 과학적 위해예측 자료를 기반으로 한 환경개선은 식품의 원천적 안전 확보를 가능하게 하며, 사후 처리 중심의 비용집약적 대응에서 벗어나 예방적, 지속가능한 관리 전략으로 전환할 기회가 될 수 있다.

국제협력 및 시나리오 기반 기후위기 대응

기후위기에 따른 식품 위해요소의 지역적 분포 변화 및 독성 증가 가능성은 국가 식품안전 체계 전반에 심대한 영향을 미칠 수 있다. 이에 따라 기후 시나리오 기반의 위해요소 위험지도를 작성하고, 위험 수준에 따라 사전에 규제 및 관리조치를 단계적으로 설계하는 정책이 필요하다. 따라서, 기후변화에 따른 식품안전 이슈에 체계적으로 대

응하기 위해 정기적인 기후-식품안전 연보를 발간하고, 정책결정자 및 종사자들이 최신 연구동향과 기술개발 정보를 신속히 파악할 수 있도록 지식기반을 마련할 필요가 있다. 이러한 체계는 해양수산부, 농촌진흥청 등 부처에서 운영 중인 선례를 참고할 수 있을 것으로 보여지며, 식품안전 분야에서도 기후변화 대응 역량 강화를 위한 기반으로 적극 도입될 필요가 있다. 또한 홍콩, 대만, 싱가포르 등 기후 변화로 인해 우리보다 먼저 위해요소 변화 양상을 겪고 있는 국가들과의 국제협력 및 데이터 공유는, 향후 국내에서 유사 상황이 전개될 가능성을 고려할 때 선제적 대응 역량을 강화하는 데 기여할 수 있을 것이다. 아열대성 국가의 수산물 독소 발생 데이터를 분석함으로써, 발생 가능성을 예측하고 대비하는 것이 대표적인 사례이다. 이러한 국제협력을 통해 국내 기후환경 변화에 따른 위해요소의 잠재적 확산 경로를 보다 정밀하게 예측하고, 기후위기 대응 전략의 국제적 정합성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

미래 전망 및 향후 발전방향

데이터 기반의 식품 위해예측 체계는 전통적인 사후대응 중심의 관리체계를 넘어 사전예방적 관리 시스템으로의 패러다임 전환을 실현하는 중요한 혁신을 가져올 것으로 기대된다. 그러나 이러한 시스템이 실효적으로 운영되기 위해서는 몇 가지 현실적 제약과 한계점에 대한 개선과 해결책 마련이 필수적이다.

먼저, 기후 및 환경 예측 자체의 불확실성을 인지하고 이러한 데이터의 변동성이 식품 위해예측 정확성에 직접적인 영향을 미칠 수 있다는 것을 고려할 필요가 있다. 즉, 극단적인 기상 이변이나 예측 불가능한 환경 변화는 모델의 정확도, 그리고 제도의 신뢰성을 저하시킬 수 있으므로, 다양한 기후 시나리오에 기반한 민감도 분석과 불확실성 평가가 지속적으로 수행되어야 한다. 장기적으로는 인공지능 기반의 예측모델이 기후·환경과 식품안전 데이터(부적합 등)의 연관성을 지속적으로 학습하여 정확도를 점진적으로 높이는 환류 체계 구축이 필요하다.

같은 맥락에서 위해예측 정확도의 정량적 검증과 성과평가 체계를 개발할 필요가 있다. 현재의 예측모델 관련 연구들은 대부분 특정 사례나 지역을 대상으로 제한된 검증만 이루어지고 있으며, 각 모델에서 도출된 예측값의 정확도를 실질적인 관측 데이터와 체계적으로 비교·평가할 수 있는 방법이 부족한 실정이다. 또한, 모델 간 성능을 비교할 수 있는 공통된 기준이나 표준화된 지표 역시 부재하여, 예측시스템의 객관적 성능 검증과 정책 적용에 한계가 존재한다. 이에 따라 예측 시스템이 산출하는 위험도 점수나 발생률 예측값과 실제 발생률 간의 일치도를 지속적으로 모니터링하고, 이를 바탕으로 모델 성능을 평가할 수 있는 표준화된 성과지표의 개발이 필수적이다. 이러한 체계는 향후 예측력의 고도화뿐 아니라 제도적 신뢰성 확보에도 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다.

이외에도 일부 식품안전 정보는 통합식품안전정보망을 통해 공유되고 있음에도, 위해예측에 필요한 기후·환경정보, 유통경로, 인구 및 기반시설 등 기존 식품안전의 범주를 벗어나는 데이터를 연계·활용하기 위한 기술적 기반은 미비하다는 것을 고려할 필요가 있다. 특히, 기상청, 농림축산검역본부, 해양수산부, 지방자치단체 등에서 수집하는 다양한 환경·생산·유통 데이터는 위해예측 정확도 향상을 위해 반드시 통합 분석이 요구되지만, 현행 시스템에서는 표준화된 데이터 포맷이나 공유 프로토콜이 부재하여 부처 간 실질적인 공동 활용이 어렵다. 이에 따라, 위해예측 관련 데이터를 효과적으로 통합·연계할 수 있도록 데이터 상호운용성을 확보하는 한편, 기관 간 정보 접근성과 분석 협업을 가능케 하는 실효적 협력 프레임워크 구축이 필요하다. 아울러, 통합 데이터 기반 예측모델 개발 및 고도화를 지원할 수 있는 전담 조직 또는 기술지원 체계 마련 또한 병행되어야 할 것이다. 이러한 전략적 발전방향들은 향후 식품 위해예측센터가 데이터 기반의 예방형 식품안전 관리체계의 핵심 플랫폼으로 자리 잡는 데 있어 필수적인 역할을 할 것으로 기대된다.

Discussion

기후위기와 공급망의 복잡성 증가에 따라, 식품의 위해발생 가능성을 과학적으로 예측하고 선제적으로 개입하는 사전예방 중심의 체계로의 전환이 필연적인 과제가 되고 있다. 본 연구는 이러한 배경 하에서, 기후·환경 인자가 식품 중 위해요소의 발생과 확산에 미치는 영향을 다각적 관점에서 검토하고, 생물학적 위해요소와 천연 독소를 중심으로 예측 가능성과 환경 민감도를 분석하였다. 또한, 국내외의 데이터 기반 위해예측 시스템 운영 사례를 종합적으로 분석함으로써, 우리나라 식품위해예측센터의 실효적 구축과 전략적 활용을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

데이터에 기반한 위해예측은 단순한 정보 수집의 차원을 넘어, 안전관리 자원의 배분, 위생감시의 효율화, 지역 맞춤형 정책 설계, 환경개선 사업의 타당성 확보 등 식품안전관리 전반의 구조를 혁신할 수 있는 핵심 수단이다. 특히, 기후변화에 민감하게 반응하는 병원성 미생물, 기생충, 곰팡이독소, 해양생물독소 등 주요 위해요소를 중심으로 위해 발생 가능성을 예측하고, 지역적 분포와 계절성을 반영한 정밀관리 전략을 수립하는 것은 식품안전의 지속가능성을 담보하는 데 있어 필수적이다.

이러한 예측체계가 효과적으로 작동하기 위해서는, 기후·환경 데이터와 식품안전 정보의 다부처 간 연계, 분석모델의 과학적 정교화, 제도화된 정책 연계 메커니즘 마련

이 병행되어야 한다. 나아가, 기후위기의 불확실성에 대응하기 위해 국내뿐 아니라 기후·환경 변화가 유사하게 나타나는 아열대 국가들과의 협력과 데이터 공유를 확대하고, 글로벌 식품안전 네트워크 내에서의 전략적 역할을 강화할 필요가 있다.

결론적으로, 식품위해예측센터는 단순한 예측정보 제공기관을 넘어, 국가 식품안전정책의 과학화와 지능화를 선도하는 중추적 플랫폼으로 기능해야 한다. 향후에는 고도화된 예측모델과 정책의 실질적 연계를 통해, 식품 위해요소의 사전 차단과 국민 건강 보호라는 정책적 목표를 실현할 수 있는 실효적 관리체계로 발전시켜 나가야 할 것이다.

국문요약

기후변화와 식품공급망의 복잡성 증대로 식품 위해요소의 발생 경로와 패턴이 다변화됨에 따라, 과학적 예측과 선제적 개입이 가능한 예방형 식품안전 관리체계의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구는 기후·환경 요인이 식품 위해요소에 미치는 영향을 분석함으로써, 기후 민감성이 높은 위해요소를 식별하고 예측 가능성과 주요 환경인자를 도출하였다. 아울러 국내외 데이터 기반 위해예측 시스템의 운영 사례를 비교·분석함으로써, 식품위해예측센터의 실질적 운영과 역할을 위한 발전방향을 제시하였다. 본 연구를 통해 향후 식품위해예측센터가 식품안전 정책의 과학화와 지능화를 이끄는 전략적 플랫폼으로 기능하고, 예방 중심의 관리체계로의 전환을 유도할 수 있도록 실효적 토대와 정책적 방향성을 제공하고자 한다.

Conflict of interests

The authors declare no potential conflict of interest.

ORCID

Jun-Hyeok Ham https://orcid.org/0009-0009-4465-0877
Yeon-Jung Lee https://orcid.org/0009-0005-4655-7220
Yu Jin Na https://orcid.org/0009-0000-7592-9728
Soyoung Gwon https://orcid.org/0009-0002-3355-861X
Mun-Gi Sohn https://orcid.org/0000-0001-9770-0940
Hae-Yeong Kim https://orcid.org/0000-0003-3409-0932

References

1. Taiwo, O.R., Onyeaka, H., Akinsemolu, A.A., Oladipo, E.K., Examining the nexus of climate change and food safety: a review. *Appl. Food Res.*, **5**, 100884 (2025).
2. Korea Disease Control and Prevention Agency (KDCA), (2025, April 17). Public health advisory on increased risk of *Vibrio vulnificus* infections during the summer months. Retrieved from https://www.kdca.go.kr/board/board.es?mid=a20501010000&bid=0015&list_no=68172&cg_code=&act=view&nPage=401
3. Korean Government, (2025, April 17). Caution advised for food storage during the monsoon season to prevent fungal contamination. Retrieved from https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148696068
4. Salubi, E.A., Gizaw, Z., Schuster-Wallace, C.J., Pietroniro, A., Climate change and waterborne diseases in temperate regions: a systematic review. *J. Water Health*, **23**, 58-78 (2025).
5. Dietrich, J., Hammerl, J.A., Johne, A., Kappenstein, O., Loeffler, C., Nöckler, K., Rosner, B., Spielmeyer, A., Szabo, I., Richter, M.H., Impact of climate change on foodborne infections and intoxications. *J. Health Monit.*, **8**, 78-92 (2023).
6. Akil, L., Ahmad, H.A., Reddy, R.S., Effects of climate change on Salmonella infections. *Foodborne Pathog. Dis.*, **11**, 974-980 (2014).
7. Zhang, Y., Bi, P., Hiller, J., Climate variations and salmonellosis transmission in Adelaide, South Australia: a comparison between regression models. *Int. J. Biometeorol.*, **52**, 179-187 (2008).
8. Butsch, C., Beckers, L.M., Nilson, E., Frassl, M., Brennholt, N., Kwiatkowski, R., Söder, M., Health impacts of extreme weather events - Cascading risks in a changing climate. *J. Health Monit.*, **8**, 33-56 (2023).
9. Patrick, M.E., Christiansen, L.E., Wainø, M., Ethelberg, S., Madsen, H., Wegener, H.C., Effects of climate on incidence of Campylobacter spp. in humans and prevalence in broiler flocks in Denmark. *Appl. Environ. Microbiol.*, **70**, 7474-7480 (2004).
10. Kuhn, K.G., Nygård, K.M., Guzman-Herrador, B., Sunde, L.S., Rimhanen-Finne, R., Trönnberg, L., Jepsen, M.R., Ruuhela, R., Wong, W.K., Ethelberg, S., Campylobacter infections expected to increase due to climate change in Northern Europe. *Sci. Rep.*, **10**, 13874 (2020).
11. Duchenne-Moutien, R.A., Neetoo, H., Climate change and emerging food safety issues: a review. *J. Food Prot.*, **84**, 1884-1897 (2021).
12. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) & World Health Organization (WHO), (2025, April 17). Risk assessment tools for Vibrio parahaemolyticus and Vibrio vulnificus associated with seafood. Retrieved from https://iris.who.int/handle/10665/330867
13. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), (2025, April 17). Foodborne illness risk prediction map. Retrieved from https://poisonmap.mfds.go.kr/main.do
14. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), (2025, April 17). Vibrio prediction system. Retrieved from https://vibrio.foodsafetykorea.go.kr/
15. Rohayem J., Norovirus seasonality and the potential impact of climate change. *Clin. Microbiol. Infect.*, **15**, 524-527 (2009).
16. Greer, A.L., Drews, S.J., Fisman, D.N., Why "winter" vomiting disease? Seasonality, hydrology, and Norovirus epidemiology in Toronto, Canada. *EcoHealth*, **6**, 192-199 (2009).

17. Kim, T.K., Paek, J., Kim, H.Y., Choi, I., Relative risk prediction of norovirus incidence under climate change in Korea. *Life*, **11**, 1332 (2021).
18. Awad, D.A., Masoud, H.A. Hamad, A., Climate changes and food-borne pathogens: the impact on human health and mitigation strategy. *Clim. Change*, **177**, 92 (2024).
19. Gertler, M., Dürr, M., Renner, P., Poppert, S., Askar, M., Breidenbach, J., Frank, C., Preußel, K., Schielke, A., Werber, D., Chalmers, R., Robinson, G., Feuerpfeil, I., Tannich, E., Gröger, C., Stark, K., Wilking, H., Outbreak of cryptosporidium hominis following river flooding in the city of Halle (Saale), Germany, August 2013. *BMC Infect. Dis.*, **15**, 88 (2015).
20. Utaaker, K.S., Robertson, L.J., Climate change and food-borne transmission of parasites: a consideration of possible interactions and impacts for selected parasites. *Food Res. Int.*, **68**, 16-23 (2015).
21. Zingales, V., Taroncher, M., Martino, P.A., Ruiz, M.J., Caloni, F., Climate change and effects on molds and mycotoxins. *Toxins*, **14**, 445 (2022).
22. Ismaiel AA, Papenbrock J., Mycotoxins: producing fungi and mechanisms of phytotoxicity. *Agriculture,* **5**, 492-537 (2015).
23. Wu, L., Qiu, L., Zhang, H., Sun, J., Hu, X., Wang, B., Optimization for the production of deoxynivalenol and zearalenone by Fusarium graminearum using response surface methodology. *Toxins*, **9**, 57 (2017).
24. Perrone, G., Ferrara, M., Medina, A., Pascale, M., Magan, N., Toxigenic fungi and mycotoxins in a climate change scenario: ecology, genomics, distribution, prediction and prevention of the risk. *Microorganisms*, **8**, 1496 (2020).
25. van der Fels-Klerx, H.J., Goedhart, P.W., Elen, O., Börjesson, T., Hietaniemi, V., Booij, C.J., Modeling deoxynivalenol contamination of wheat in northwestern Europe for climate change assessments. *J. Food Prot.*, **75**, 1099-1106 (2012).
26. Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N.M., 2019. The ocean and cryosphere in a changing climate. IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate, Cambridge University Press, Cambridge, MA, USA.
27. UNESCO Digital Library, (2025, April 17). Harmful algal blooms: a scientific summary for policy makers. Retrieved from https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000233419
28. Rural Development Administration (RDA), (2025, April 17). Agro-weather 365. Retrieved from https://weather.rda.go.kr/
29. Rural Development Administration (RDA), (2025, April 17). Agrometeorological disaster early warning system. Retrieved from https://agmet.kr/
30. Rural Development Administration (RDA), (2025, April 17). National crop pest management system. Retrieved from https://ncpms.rda.go.kr/npms/NewSpaceDistributionSearchR.np
31. Rural Development Administration (RDA), (2025, April 17). Meteorological information system for livestock management. Retrieved from https://chuksaro.nias.go.kr/lwis/gis/tpIdex/tpIdex.do
32. Ministry of Environment (ME), (2025, April 17). Water environment information system. Retrieved from https://water.nier.go.kr/web/algaeBeforInfo?pMENU_NO=16
33. United States Department of Agriculture (USDA), (2025, April 17). Pathogen modeling program (PMP) online. Retrieved from https://pmp.errc.ars.usda.gov/tutorial.aspx
34. European Centre for Disease Prevention and Control (ECDC), (2025, April 17). ECDC quantitative microbial risk assessment (QMRA) tool. Retrieved from https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/tools/ecdc-quantitative-microbial-risk-assessment-qmra-tool
35. European Union (EU), (2025, April 17). S-3 EUROHAB. Retrieved from https://www.s3eurohab.eu/
36. European Food Safety Authority (EFSA), (2025, April 17). Risk characterisation of ciguatera poisoning in Europe. Retrieved from https://www.efsa.europa.eu/en/supporting/pub/en-6647
37. Louis, V.R., Gillespie, I.A., O'Brien, S.J., Russek-Cohen, E., Pearson, A.D., Colwell, R.R., Temperature-Driven campylobacter seasonality in England and Wales. *Appl. Environ. Microbiol.*, **71**, 85-92 (2005).
38. Soneja, S., Jiang, C., Upperman, C.R., Murtugudde, R., Mitchell, C.S., Blythe, D., Sapkota, A.R., Sapkota, A., Extreme precipitation events and increased risk of campylobacteriosis in Maryland, USA. *Environ. Res.*, **149**, 216-221 (2016).
39. Rosef, O., Rettedal, G., Lågeide, L., Thermophilic campylobacters in surface water: a potential risk of campylobacteriosis. *Int. J. Environ. Health Res*., **11**, 321-327 (2001).
40. Fleury, M., Charron, D.F., Holt, J.D., Allen, O.B., Maarouf, A.R., A time series analysis of the relationship of ambient temperature and common bacterial enteric infections in two Canadian provinces. *Int. J. Biometeorol.*, **50**, 385-391 (2006).
41. Smith, B.A., Meadows, S., Meyers, R., Parmley, E.J., Fazil, A., Seasonality and zoonotic foodborne pathogens in Canada: relationships between climate and Campylobacter, E. coli and Salmonella in meat products. *Epidemiol. Infect*., **147**, e190 (2019).
42. D'Souza, R.M., Becker, N.G., Hall, G., Moodie, K.B.A., Does ambient temperature affect foodborne disease?. *Epidemiology*, **15**, 86-92 (2004).
43. Zhang, Y., Bi, P., Hiller, J.E., Climate variations and Salmonella infection in Australian subtropical and tropical regions. *Sci. Total Environ.*, **408**, 524-530 (2010).
44. Yard, E.E., Murphy, M.W., Schneeberger, C., Narayanan, J., Hoo, E., Freiman, A., Lewis, L.S., Hill, V.R., Microbial and chemical contamination during and after flooding in the Ohio River-Kentucky, 2011. *J. Environ. Sci. Health A*, **49**, 1236-1243 (2014).
45. Khan, I., Khan, F., Ahmad, S., Pandey, P., Khan, M.M., 2021. Microbes and climate: a tangled relation, Microbiomes and the Global Climate Change, Springer, Singapore, pp. 3-15.
46. Semenza, J.C., Herbst, S., Rechenburg, A., Suk, J.E., Höser, C., Schreiber, C., Kistemann, T., Climate change impact

assessment of food-and waterborne diseases. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, **42**, 857-890 (2012).
47. Martinez-Urtaza, J., Bowers, J.C., Trinanes, J., DePaola, A., Climate anomalies and the increasing risk of Vibrio parahaemolyticus and Vibrio vulnificus illnesses. *Food Res. Int.*, **43**, 1780-1790 (2010).
48. Vezzulli, L., Brettar, I., Pezzati, E., Reid, P.C., Colwell, R.R., Höfle, M.G., Pruzzo, C., Long-term effects of ocean warming on the prokaryotic community: evidence from the vibrios. *ISME J.*, **6**, 21-30 (2011).
49. Böer, S.I., Heinemeyer, E.A., Luden, K., Erler, R., Gerdts, G., Janssen, F., Brennholt, N., Temporal and spatial distribution patterns of potentially pathogenic Vibrio spp. at recreational beaches of the German North Sea. *Microb. Ecol.*, **65**, 1052-1067 (2013).
50. Cantet, F., Hervio-Heath, D., Caro, A., Le Mennec, C., Monteil, C., Quéméré, C., Jolivet-Gougeon, A., Monfort, P., Quantification of Vibrio parahaemolyticus, Vibrio vulnificus and Vibrio cholerae in French Mediterranean coastal lagoons. *Res. Microbiol.*, **164**, 867-874 (2013).
51. Nel, J., Richards, L., Climate change and impact on infectious diseases. *Wits J. Clin. Med.*, **4**, 129-134 (2022).
52. Vezzulli, L., Colwell, R.R., Pruzzo, C., Ocean warming and spread of pathogenic Vibrios in the aquatic environment. *Microb. Ecol.*, **65**, 817-825 (2013).
53. Strawn, L.K., Fortes, E.D., Bihn, E.A., Nightingale, K.K., Gröhn, Y.T., Worobo, R.W., Wiedmann, M., Bergholz, P.W., Landscape and meteorological factors affecting prevalence of three foodborne pathogens in fruit and vegetable farms. *Appl. Environ. Microbiol.*, **79**, 588-600 (2013).
54. Beuchat, L.R., Ecological factors influencing survival and growth of human pathogens on raw fruits and vegetables. *Microbes Infect.*, **4**, 413-423 (2002).
55. Kotzekidou, P., 2016. Factors influencing microbial safety of ready-to-eat foods. In Food hygiene and toxicology in readyto-eat foods, Academic Press, Cambridge, MA, USA, pp. 33-50.
56. Nga, D.D.Y., Nhung, V.H., Nhan, N.T., Hien, T.T., Study on the concentration, composition, and recovery rate of bacterial bioaerosols after rainfall in Ho Chi Minh City. *Environ. Monit. Assess.*, **196**, 295 (2024).
57. Sibanda, T., Ntuli, V., Neetoo, S.H., Habib, I., Njage, P.M.K., Parry-Hanson Kunadu, A., Andoh, A.H., Coorey, R., Buys, E.M., Listeria monocytogenes at the food-human interface: a review of risk factors influencing transmission and consumer exposure in Africa. *Int. J. Food Sci. Technol.*, **58**, 4114-4126 (2023).
58. Goulet, V., Hedberg, C., Le Monnier, A., de Valk, H., Increasing incidence of listeriosis in France and other European countries. *Emerg. Infect. Dis.*, **14**, 734-740 (2008).
59. Schoder, D., Guldimann, C., Märtlbauer, E., Asymptomatic carriage of Listeria monocytogenes by animals and humans and its impact on the food chain. *Foods*, **11**, 3472 (2022).
60. Asadishad, B., Ghoshal, S., Tufenkji, N., Role of cold climate and freeze-thaw on the survival, transport, and virulence of Yersinia enterocolitica. *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 14169-14177 (2013).
61. Martínez, P.O., Mylona, S., Drake, I., Fredriksson-Ahomaa, M., Korkeala, H., Corry, J.E., Wide variety of bioserotypes of enteropathogenic Yersinia in tonsils of English pigs at slaughter. *Int. J. Food Microbiol.*, **139**, 64-69 (2010).
62. Minas, M., Minas, A., Gourgulianis, K., Stournara, A., Epidemiological and clinical aspects of human brucellosis in Central Greece. *Jpn. J. Infect Dis.*, **60**, 362-366 (2007).
63. Dadar, M., Shahali, Y., Fakhri, Y., A primary investigation of the relation between the incidence of brucellosis and climatic factors in Iran. *Microb. Pathog.*, **139**, 103858 (2020).
64. Fremaux, B., Prigent-Combaret, C., Vernozy-Rozand, C., Long-term survival of Shiga toxin-producing Escherichia coli in cattle effluents and environment: an updated review. *Vet. Microbiol.*, **132**, 1-18 (2008).
65. Feliciano, R., Boué, G., Mohssin, F., Hussaini, M.M., Membré, J.M., Probabilistic modelling of Escherichia coli concentration in raw milk under hot weather conditions. *Food Res. Int.*, **149**, 110679 (2021).
66. Acquaotta, F., Ardissino, G., Fratianni, S., Perrone, M., Role of climate in the spread of shiga toxin-producing Escherichia coli infection among children. *Int. J. Biometeorol.*, **61**, 1647-1655 (2017).
67. Sargeant, J.M., Sanderson, M.W., Smith, R.A., Griffin, D.D., Associations between management, climate, and Escherichia coli O157 in the faeces of feedlot cattle in the Midwestern USA. *Prev. Vet. Med.*, **66**, 175-206 (2004).
68. Kim, E., Kim, B.I., Characteristics and related factors of waterborne and foodborne infectious disease outbreaks before and after the onset of the COVID-19 pandemic (2017-2021) in the Republic of Korea: a descriptive study. *Osong Public Health Res. Perspect.*, **14**, 483-493 (2023).
69. Manchal, N., Young, M.K., Castellanos, M.E., Leggat, P., Adegboye, O., A systematic review and meta-analysis of ambient temperature and precipitation with infections from five food-borne bacterial pathogens. *Epidemiol. Infect.*, **152**, e98 (2024).
70. Ai, S., Zhou, H., Wang, C., Qian, Z.M., McMillin, S.E., Huang, C., Zhang, T., Xu, L., Li, Z., Lin, H., Effect and attributable burden of hot extremes on bacillary dysentery in 31 Chinese provincial capital cities. *Sci. Total Environ.*, **832**, 155028 (2022).
71. Wang, Y., Li, M., Li, Z., Chai, R., Dong, X., Xu, H., Whan, J., Yao, L., Zhang, Y.,. Zhao, Q., Yao, Y., Effect of temperature and its interaction with other meteorological factors on bacillary dysentery in Jilin Province, China. *Epidemiol. Infect.*, **149**, e121 (2021).
72. Ahmed, S.M., Lopman, B.A., Levy, K., A systematic review and meta-analysis of the global seasonality of norovirus. *PloS One*, **8**, e75922 (2013).
73. Kim, Y.S., Park, K.H., Chun, H.S., Choi, C., Bahk, G.J., Correlations between climatic conditions and foodborne disease. *Food Res. Int.*, **68**, 24-30 (2015).
74. Kraay, A.N., Brouwer, A.F., Lin, N., Collender, P.A.,

Remais, J.V., Eisenberg, J.N., Modeling environmentally mediated rotavirus transmission: the role of temperature and hydrologic factors. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, **115**, E2782-E2790 (2018).
75. Levy, K., Hubbard, A.E., Eisenberg, J.N., Seasonality of rotavirus disease in the tropics: a systematic review and meta-analysis. *Int. J. Epidemiol.*, **38**, 1487-1496 (2008).
76. Carlton, E.J., Woster, A.P., DeWitt, P., Goldstein, R.S., Levy, K., A systematic review and meta-analysis of ambient temperature and diarrhoeal diseases. *Int. J. Epidemiol.*, ***45***, 117-130 (2015).
77. Saad-Hussein, A., Ramadan, H. K.-A., Bareedy, A., Elwakil, R., Role of climate change in changing hepatic health maps. *Curr. Environ. Health Rep.*, **9**, 299-314 (2022).
78. Adibin, Aisnah, Indrawati, Sumriati, Ramadhan, T., Increased risk of hepatitis a due to weather changes: a review. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.,* **755**, 012085 (2021).
79. Fares, A., Seasonality of hepatitis: a review update. *J. Family Med. Prim. Care*, **4**, 96-100 (2015).
80. Kistemann, T., Claßen, T., Koch, C., Dangendorf, F., Fischeder, R., Gebel, J., Vacata, V., Exner, M., Microbial Load of Drinking Water Reservoir Tributaries during Extreme Rainfall and Runoff. *Appl. Environ. Microbiol.*, **68**, 2188-2197 (2002).
81. Patz, J.A., Engelberg, D., Last, J., The effects of changing weather on public health. *Annu. Rev. Public Health.*, **21**, 271-307 (2000).
82. Robertson, L.J., Torgerson, P.R., van der Giessen, J., Foodborne parasitic diseases in Europe: social cost-benefit analyses of interventions. *Trends Parasitol.*, **34**, 919-923 (2018).
83. Sterk, A., Schijven, J., de Roda Husman, A.M., de Nijs, T., Effect of climate change on runoff of Campylobacter and Cryptosporidium from land to surface water. *Water Res.*, **95**, 90-102 (2016).
84. Chhaya, R.S., O'Brien, J., Cummins, E., Feed to fork risk assessment of mycotoxins under climate change influences-recent developments. *Trends Food Sci. Technol.*, **126**, 126-141 (2022).
85. Udovicki, B., Djekic, I., Kalogianni, E.P., Rajkovic, A., Exposure assessment and risk characterization of aflatoxin m1 intake through consumption of milk and yoghurt by student population in Serbia and Greece. *Toxins*, **11**, 205 (2019).
86. Cervini, C., Verheecke-Vaessen, C., Ferrara, M., García-Cela, E., Magistà, D., Medina, A., Gallo, A., Magan, N., Perrone, G., Perrone, G., Interacting climate change factors (CO_2 and temperature cycles) effects on growth, secondary metabolite gene expression and phenotypic ochratoxin A production by Aspergillus carbonarius strains on a grape-based matrix. *Fungal Biol.*, **125**, 115-122 (2021).
87. Paterson, R.R.M., Lima, N., How will climate change affect mycotoxins in food?. *Food Res. Int.*, **43**, 1902-1914 (2010).
88. Hooker, D.C., Schaafsma, A.W., Tamburic-Ilincic, L., Using weather variables pre-and post-heading to predict deoxynivalenol content in winter wheat. *Plant Dis*., **86**, 611-619 (2002).
89. Van der Fels-Klerx, H.J., van Asselt, E.D., Madsen, M.S., Olesen, J.E., Impact of climate change effects on contamination of cereal grains with deoxynivalenol. *PLoS One*, **8**, e73602 (2013).
90. Casu, A., Camardo Leggieri, M., Toscano, P., Battilani, P., Changing climate, shifting mycotoxins: a comprehensive review of climate change impact on mycotoxin contamination. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, **23**, e13323 (2024).
91. Friedman, M.A., Fernandez, M., Backer, L.C., Dickey, R.W., Bernstein, J., Schrank, K., Kibler, S., Stephan, W., Gribble, M.O., Bienfang, P., Bowen, R.E., Degrasse, S., Flores Quintana, H.A., Loeffler, C.R., Weisman, R., Blythe, D., Berdalet, E., Ayyar, R., Clarkson-Townsend, D., Swajian, K., Benner, R., Brewer, T., Fleming, L.E., An updated review of ciguatera fish poisoning: clinical, epidemiological, environmental, and public health management. *Mar. Drugs.*, **15**, 72 (2017).
92. Kibler, S.R., Litaker, R.W., Holland, W.C., Vandersea, M.W., Tester, P.A., Growth of eight Gambierdiscus (dinophyceae) species: effects of temperature, salinity and irradiance. *Harmful Algae*, **19**, 1-14 (2012).
93. Naknaen, A., Ratsameepakai, W., Suttinun, O., Sukpondma, Y., Khan, E., Pomwised, R. Microcystis Sp. Co-Producing microcystin and saxitoxin from songkhla lake Basin, Thailand. *Toxins*, **13**, 631 (2021).
94. Meng, R., Du, X., Ge, K., Wu, C., Zhang, Z., Liang, X., Yang, J., Zhang, H., Does climate change increase the risk of marine toxins? Insights from changing seawater conditions. *Arch. Toxicol*., **98**, 2743-2762 (2024).