

## 항생제 오염관리를 위한 인공습지의 연구동향: 계량서지학 분석 및 종합검토

오유경\* · 미구엘\* · 비스포치니\* · 전민수\* · 김이형\*\*\*

\*국립공주대학교 건설환경공학과  
\*\*국립공주대학교 스마트인프라공학과

## Exploring Research Trends on Antibiotic Pollution Control in Constructed Wetlands through a Bibliometric Analysis and Comprehensive Review

Yugyeong Oh\* · Miguel Enrico Robles\* · Chiny Vispo\* · Minsu Jeon\* · Leehyung Kim\*\*+

\*Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University

\*\*Department of Smart Infrastructure Engineering, Kongju National University

(Received : 20 October 2024, Revised : 22 November 2024, Accepted : 27 November 2024)

### 요약

생태적 기작을 가진 인공습지는 영양염류 제거를 위한 수질정화시설로 활용성이 높다. 그러나 수중환경에서 검출빈도와 농도가 증가하는 항생제를 포함하는 미량오염물질이 인공습지에 주는 영향에 대한 연구는 미흡한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 계량서지학적 분석을 통해 인공습지의 항생제 오염관리에 대한 현재까지의 연구 진행상황과 향후 연구동향을 조사하였다. 수중환경에 나타난 항생제 항목을 분석하기 위하여 최근 출판된 논문 100편을 기반으로 종합적 분석 및 검토를 수행하였다. 항생제 관리를 위한 인공습지의 연구동향 분석과 수중환경에 나타난 항생제 항목을 파악하고자 계량서지학적 분석을 통해 다양한 논문 및 보고서를 기반으로 포괄적으로 검토를 수행하였다. 계량서지학적 분석결과 과거 인공습지의 기능은 질소, 인, 암모니아 등 영양염류 제거에 초점을 두었지만 최근들어 항생제, 항생제 내성률, 미생물 처리기작에 대한 관심이 증가하고 있는 것으로 나타났다. 수중환경에서 주로 검출되는 항생제는 Tetracyclines계열과 Sulfonamides계열 항생제로 각각 23%와 21%를 차지하였으며, 생물학적 처리시설보다 생태학적 처리기작을 가진 인공습지가 다소 높은 항생제 처리효율을 보였다. 그러나 항생제 종류별 검출빈도와 농도가 다르며 검출항목에 따라 생태계에 주는 항생제의 화학적 구조 및 특성에 대한 연구결과가 일관되지 않기에 지속적인 연구가 필요한 것으로 평가하였다.

핵심용어 : 인공습지, 미량오염물질, 항생제, 처리효율, 계량서지학적 분석

### Abstract

Constructed wetlands with ecological mechanisms have been identified as highly effective water purification systems for nutrient removal. However, research on the impact of antibiotics as micropollutants in constructed wetlands remain limited. To address this gap, the current state and future trends of research on antibiotic pollution management in constructed wetlands were investigated through bibliometric analysis. Additionally, a comprehensive review was performed based on 100 recently published papers to analyze the characteristics of various antibiotic types detected in aquatic and wetland environments. It was found that earlier studies primarily focused on nutrient removal, including nitrogen, phosphorus, and ammonia, while recent attention has shifted toward antibiotics, antibiotic resistance, and microbial treatment mechanisms. Tetracyclines (23%) and sulfonamides (21%) were identified as the most commonly detected antibiotics in aquatic and wetland environments. Constructed wetlands

+To whom correspondence should be addressed.

Department of Smart Infrastructure Engineering, Kongju National University, Korea  
E-mail : leehyung@kongju.ac.kr

- **Yugyeong Oh** Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University / Graduate Student (yugyeong@smail.kongju.ac.kr)
- **Miguel Enrico Robles** Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University / Graduate Student (roblesmiguel@smail.kongju.ac.kr)
- **Chiny Vispo** Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University / Graduate Student (ccvispo@smail.kongju.ac.kr)
- **Minsu Jeon** Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University / Research Fellow (minsu91@kongju.ac.kr)
- **Leehyung Kim** Department of Smart Infrastructure Engineering, Kongju National University / Professor (leehyung@kongju.ac.kr)

with ecological treatment mechanisms were observed to achieve higher antibiotic removal efficiencies compared to biological treatment facilities. The detection frequency and concentrations of antibiotics were found to vary depending on their type, and inconsistencies were identified in studies on the chemical structure and characteristics of antibiotics affecting ecosystems, emphasizing the need for continued research.

Key words : Constructed wetlands, Emerging pollutants, Antibiotics, Removal efficiency, Bibliometric analysis

## 1. 서론

산업화와 도시화로 인한 다양한 화학물질이 개발되고 사용됨에 따라, 환경에서 미량오염물질(Emerging pollutants; Micropollutants)의 종류와 검출빈도가 증가하고 있다. 미량오염물질은 매우 낮은 농도(수 ng/L에서 수  $\mu\text{g/L}$  수준)로 존재하지만 생태계와 사람의 건강에 큰 영향을 줄 수 있다(Burkhardt-Holm, 2011; Włodarczyk-Makuła et al., 2021). 미량오염물질에는 의약품, 개인위생용품(PPCPs), 살충제, 호르몬 등 다양한 종류가 포함되며, 기존 하수 및 폐수 처리시스템에서 완전하게 제거되지 못한 상태에서 환경으로 유입된다. 미량오염물질들은 환경에서 축적성과 생물농축성으로 인하여 장기적으로 생태계 균형을 파괴하고 사람의 건강에 부정적인 영향을 준다(Nguyen et al., 2024). 미량오염물질 중에서 항생제(Antibiotics)는 가정하수 및 축산폐수 등의 경로를 통하여 발생하며 낮은 농도에서도 미생물의 성장에 영향을 준다. 또한 항생제는 생물학적 처리공정인 하수처리장 및 축산폐수처리장에서 완전히 제거되지 않은 상태에서 하천과 같은 수계로 배출되면서 지속적인 환경문제를 야기한다. 항생제는 생태독성을 유발시키면서 생물군집의 균형을 파괴하며, 장기적으로 항생제 내성균의 확산을 유발시키는 원인이 되고 있다(Fernandez-Fontaina et al., 2012; Kulik et al., 2023).

인공습지(Constructed Wetlands, CWs)는 수질정화 목적으로 오랜 기간 사용되어왔다. 인공습지는 자연 기반의 생태적 처리시스템이며 식물, 토양여재, 미생물의 상호작용으로 수중의 오염물질을 물리화학적 및 생태학적 과정을 통해 제거한다(Gorgoglione and Torretta, 2018; Resende et al., 2019). 인공습지는 영양염류(질소, 인 등), 중금속, 유기물 등 다양한 종류의 오염물질을 효과적으로 제거할 수 있으며, 최근 도시 및 각종 폐수에서의 의약품 처리 능력에 대한 관심이 증가하고 있다(Khan et al., 2020). 하수 및 폐수는 다양한 경로를 통해 배출되며 풍부한 미생물 군집을 포함하고 있으며 중금속, 항생제 잔류물 및 기타 새로운 오염물질도 포함하고 있다. 기존 폐수처리공정은 입자상 물질 및 미생물 분해가능 유기물의 제거에 중점을 두었기에 환경에서 검출되는 PPCP와 그 생물 활성 대사산물의 공급원으로 간주될 수 있다(Fu et al., 2019). 일반적으로 오존처리, 광촉매, 활성탄에 의한 흡수, 막 여과 및 막 생물반응기와 같은 일부 고급 폐수처리시스템은 미량오염물질의 배출을 줄일 수 있다(Kovalova et al., 2013). 그러나 이러한 기술은 비용이 높고 정교한 운영 및 유지보수 시스템을 기반으로 하고 있기에 PPCP를 함유하는 일반적 하수처리나 축산폐수처리공정에서

는 적용이 쉽지 않다(Dordio et al., 2010). 또한 일반하수 또는 축산폐수처리공정에서는 항생제 내성 박테리아(ARB) 및 항생제 내성 유전자(ARG) 제거도 효과적이지 않다(Anthony et al., 2020; Rizzo et al., 2013). 인공습지는 복합적 기능에 의한 다양한 생태계서비스 기능으로 인하여 비용효율적 방식으로 연구와 적용이 확대되고 있다(Rahman et al., 2020). 이는 생물서식처를 제공하면서 생물다양성을 증진시키고 생태적 기작에 근거하여 다양한 조절기능을 가진 자연기반해법(Nature-based Solutions, NbS)에 해당한다(Agaton et al., 2023). 도시폐수에서 발견된 항생제 중 sulfamethoxazole, ofloxacin, metronidazole 등 인공습지를 통해 90% 이상 제거되면서 효과적인 처리기술로 확인되었음에도 불구하고(Ávila et al., 2021), 가축지역에서 발생하는 항생제는 경로가 다양하므로 지속적인 연구가 필요하다. 따라서 본 연구는 항생제 특성이 연구에 반영된 인공습지의 연구동향을 조사하여 향후 항생제에 의한 습지의 영향을 분석하기 위한 기초자료 확보를 위하여 수행되었다. 본 연구는 계량서지학적 분석을 통해 항생제의 수중환경 검출 현황 및 하수처리장과 인공습지의 항생제 제거 효율성을 분석하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 계량서지학적 분석

본 연구는 Scopus 데이터베이스를 활용하여 인공습지(Constructed Wetlands)와 항생제(Antibiotics) 관련 연구는 문헌을 수집하고 계량서지학적 분석을 수행하였다. 계량서지학적 분석은 키워드, 국가, 인용문, 용어 등 문헌 정보를 이용하여 특정 분야에 대한 연구현황을 파악하는 연구방법이다(Yang et al., 2021). 본 연구에서는 인공습지로부터 오염관리하는 항생제의 연구현황과 다양한 경로로 발생하는 축산계 항생제 관리가 필요한 항목을 파악하기 위하여 키워드를 Table 1에 정리하였다. 검색 범위는 2004년부터 2024년까지로 제한하여 총 1,359개의 문헌이 검색되었고, 이 중 리뷰 논문을 제외한 1,100개의 문헌을 분석에 포함하였다. 수집된 문헌 데이터는 Research Information System (RIS) 파일로 다운로드 후, CorText Manager 소프트웨어를 사용하여 분석하였다. 데이터 정제과정에서는 중복된 항목과 오류 데이터를 제거하고, 키워드 표준화를 통해 데이터의 정확성을 보장하였다.

계량서지학적 분석은 네트워크 매핑(Network mapping)과 교차 분석 매트릭스(Contingency Matrix)를 사용하여 수행되었다. 네트워크 매핑을 통해 연구주제와 키워드 간의 상관관계를 시각화하였고, 연구동향을 분석하였다. 교차 분석 매

트릭스는 키워드와 국가 간의 상관성을 분석하여 국가별 연구 집중도를 평가하였다. 또한, 분석의 정확성을 높이기 위해 변수 간 독립성과 상관성을 평가하는 통계적 척도인 Chi-Square( $\chi^2$ ) 통계기법을 사용하였다(Turhan, 2020). 이 과정을 통해 인공습지와 항생제 관련 연구의 전반적인 동향과 연구공백을 파악할 수 있었다.

2.2 종합적 문헌검토: 항생제 검출 현황 및 제거효율

종합적 문헌검토는 특정 키워드나 연구주제와 관련된 기존 문헌을 체계적이고 비판적으로 평가하는 연구방법이다. 이 방법은 다양한 출처에서 데이터 수집, 분석, 통계적 해석을 통해 특정 분야에서 기존 지식에 대하여 포괄적이고 편향되지 않은 정보를 제공하는 것이다. 본 연구에서는 계량서지학

적 분석을 통해 인공습지 및 항생제와 관련된 특정 키워드를 추가하여 1100개의 문헌 데이터를 173개로 정제하여 다운로드 가능한 데이터로 구체화하였다. 도출된 문헌 중 최근 출판된 100편의 논문을 선정하여 종합적 문헌검토를 진행하였다(Fig. 1). 검토 대상 논문은 인공습지를 이용한 폐수처리, 특히 항생제가 인공습지 내에서 미치는 영향에 초점을 맞추었다. 검토 항목으로는 항생제의 검출빈도, 농도, 그리고 제거효율을 중점적으로 분석하였다. 이를 통해 물환경에 검출되는 항생제 항목에 대한 정보와 연구동향을 살펴볼 수 있으며, 자연기반해법인 인공습지가 항생제를 처리하는데 얼마나 효과적인지 평가하여 향후 연구방향을 제시하는 데 기초자료로 활용가능하다.

Table 1. List of keywords selected for Bibliometric analysis

Existing keywords	constructed wetland* / micropollutant* / antibiotic* / PPCP* animal* / livestock*
Additional keywords (after Network mapping)	wetland* / concentration* / antibiotic resistance* / wastewater*

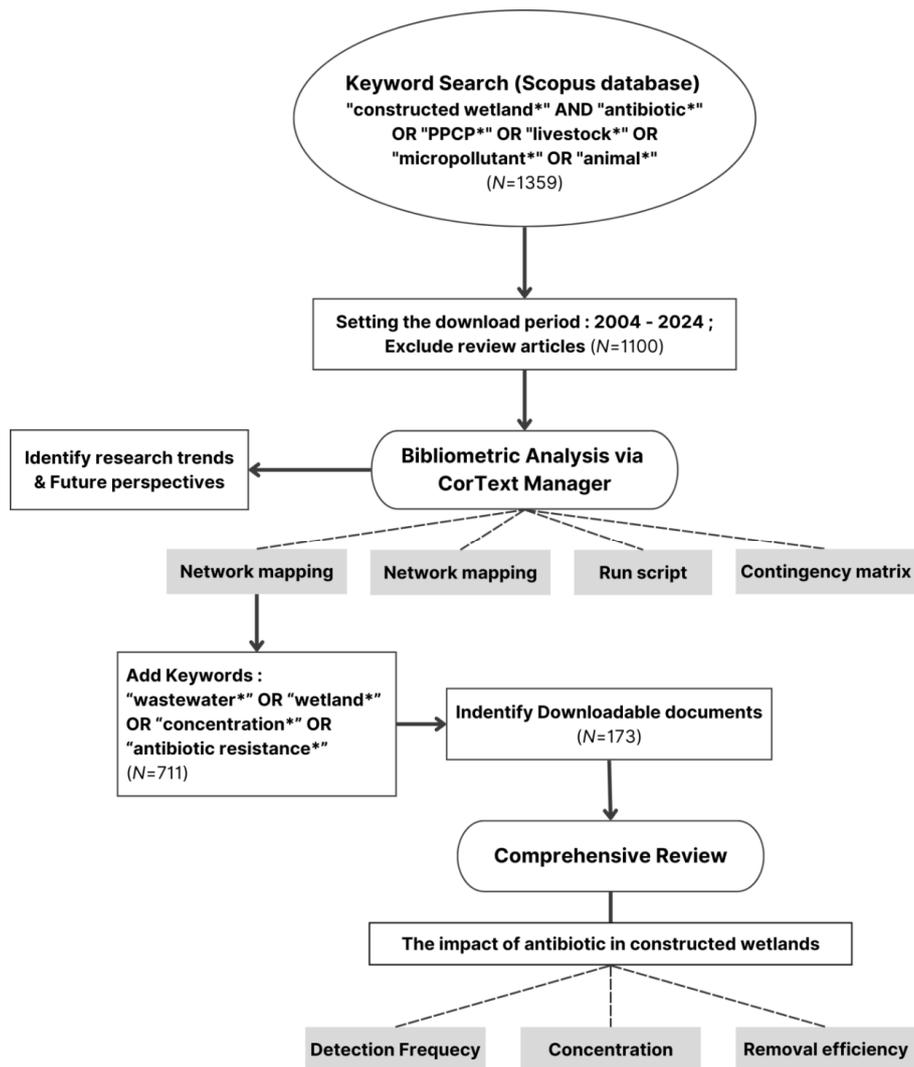


Fig. 1 Methodology Framework of Literature Review on Antibiotic Detection in Constructed Wetlands

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 계량서지학 분석

##### 3.1.1 연도별 논문 수 추이 및 주요 학술지 분석

인공습지와 항생제에 관한 연구를 대상으로 Scopus 데이터베이스에서 논문을 검색하여 분석하였다. 논문이 출판된 학술지의 분포를 분석한 결과, 관련 연구가 다수 게재된 상위 학술지는 Science of the Total Environment로 총 139편의 논문이 게재되었다. 그 뒤를 이어 Chemosphere에서 71편, Ecological Engineering에서 53편, Water Science and Technology에서 49편, Journal of Environmental Management에서 45편의 논문이 출판되었다(Table 2).

이 상위 5개의 학술지는 관련 연구에서 두드러진 기여를 하고 있으며, 전체 논문 중 약 26%가 이들 학술지에 게재되었다. 특히 Science of the Total Environment와 Chemosphere는 환경과 관련된 연구에서 중요한 학술지로 자리잡고 있으며, 인공습지 및 항생제 관련 연구의 핵심적인 출판지로 확인되었다. 이러한 동일한 연구주제를 가진 연구자들이 투고

Table 2. The number of articles per journal for the Scopus keyword search “constructed wetland\*” and “antibiotic\*” or “PPCP\*” or “livestock\*” or “micropollutant\*” or “animal\*”

Journal	Number of articles
Science of the Total Environment	139
Chemosphere	71
Ecological Engineering	53
Water Science and Technology	49
Journal of Environmental Management	45
Environmental Science and Pollution Research	45
Water Research	41
Bioresource Technology	41
Journal of Hazardous Materials	33
Environmental Pollution	33

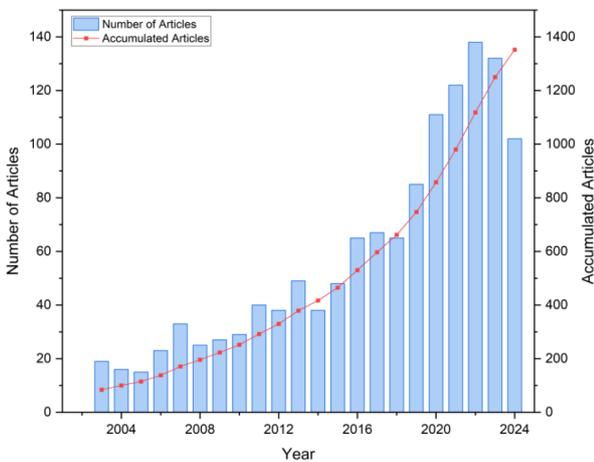


Fig. 2 Trend in annual publication of documents and cumulative citations

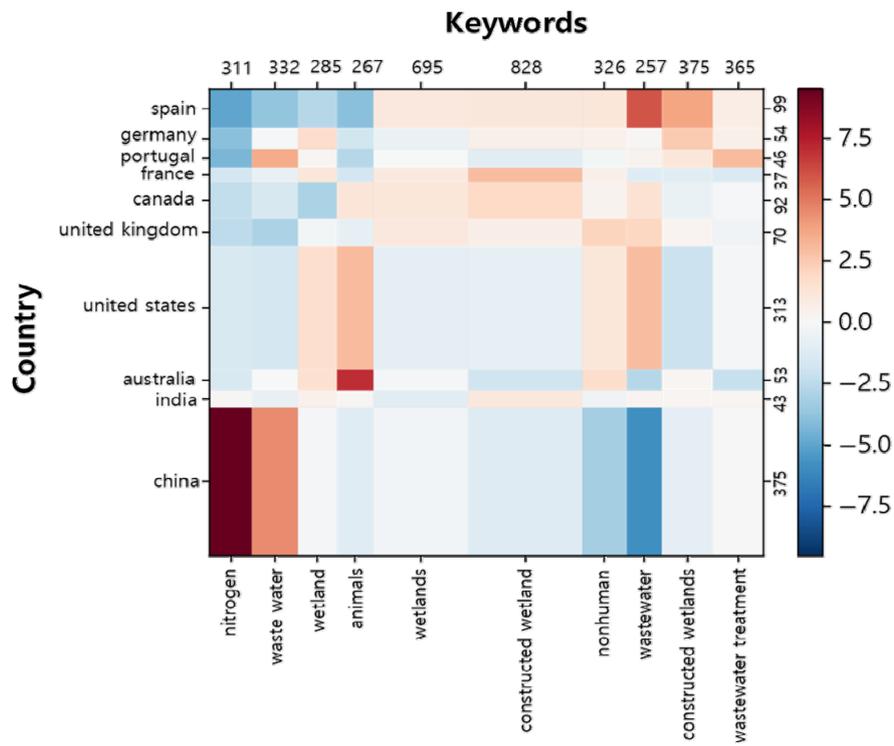
할 학술지를 선정하거나, 향후 협력 기회를 모색하는 데 중요한 참고자료가 될 수 있다(Prime & Hemminger, 2010). 인공습지와 항생제 관련 연간 출판물의 추세는 Fig. 2와 같다. 연도별 논문 발행 수는 2004년 이후 꾸준히 증가하는 경향을 보였으며, 2016년 이후 급격한 상승세를 보였다. 2020년대에 접어들면서 연간 120편 이상의 논문이 출판되었으며, 누적 논문 수는 2024년까지 약 1,400편에 이를 것으로 예상된다.

##### 3.1.2 키워드 변화 및 상관성 분석

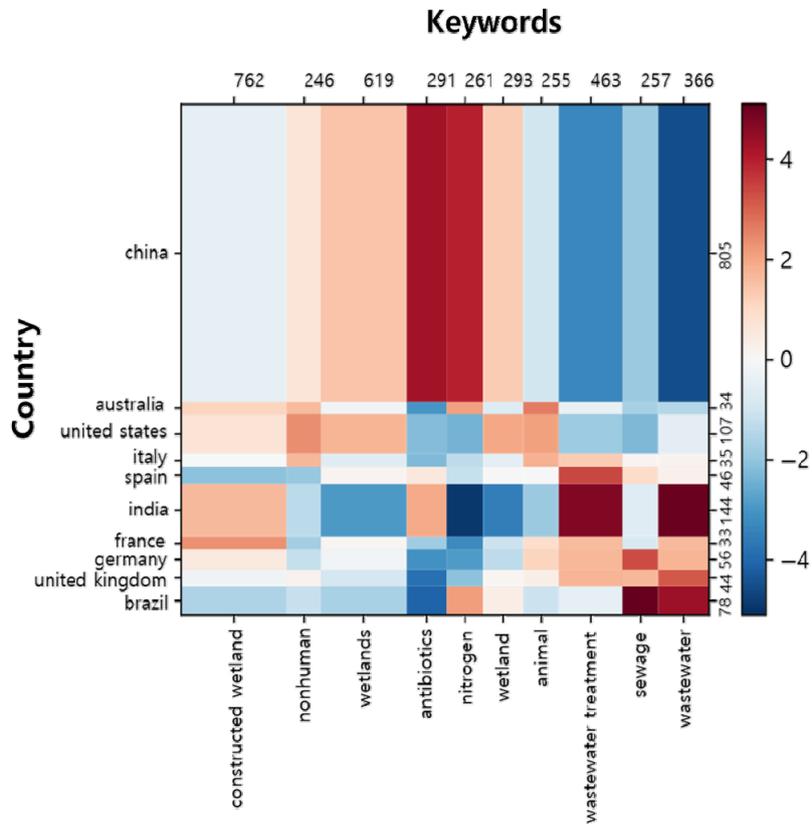
키워드와 국가 간의 동시 발생을 강조하는 상관 행렬은 Fig. 3과 같다. 이 행렬은 각 나라에서 “constructed wetland,” “antibiotic,” “PPCPs,” “livestock,” “micropollutant,” “animal”의 키워드와 관련된 연구가 얼마나 자주 수행되었는지를 시각적으로 강조하고 있다. 붉은색 셀은 두 분야 간의 동시 발생빈도가 높음을 나타내며, 파란색 셀은 두 분야 간의 동시 발생빈도가 낮음을 의미하며, 흰색 셀은 두 분야 간 중립적 관계를 의미한다(Breucker et al., 2016). 행렬의 상단과 오른쪽에 있는 숫자는 해당 국가에서 출판된 논문의 수(세로축)와 특정 키워드를 포함하는 논문의 수(가로축)를 나타낸다. 그림(a)는 과거기간(2004–2019)의 행렬이며, 그림(b)는 최근 기간(2020–2024)의 행렬로 과거와 현재를 비교 분석하였다. 그림(a)의 생성된 행렬에서 중국은 “nitrogen”과 “waste water”의 키워드가 높은 동시 발생빈도를 보였다. 그러나 “constructed wetlands” 및 “constructed wetland” 키워드는 낮은 발생빈도로 나타났다. 2004–2019년 기간에는 폐수 내 질소를 제거하는 주제와 관련된 연구가 많이 수행된 것으로 평가되었다. 그림(b)의 생성된 행렬에서 “antibiotic,” “nitrogen,” “wetland”의 키워드가 중국에서 높은 발생빈도로 나타났다. 중국은 과거와 현재 모두 질소에 대한 지속적인 연구를 진행하고 있으며 새로운 오염물질로 항생제가 떠오른 것을 매트릭스를 통해 확인하였다. 또한 습지에 대한 관심이 높아지면서 습지가 오염물질 처리기술로 주목받고 있음을 확인하였다. 중국은 인공습지의 질소와 인을 중요한 수질평가지표로 지속적으로 사용하고 있으며, 새로운 오염물질을 중점대상으로 추가하는 것으로 평가되었다(Liu et al., 2024). 그림(a)의 chi2 score는 164.7 (p-value 3.13e-08)이고, 그림(b)의 chi2 score는 173.7 (p-value 2.85e-09)로 나타나 두 변수 간에 매우 유의미한 상관관계를 보였다.

##### 3.1.3 Network mapping 시각화

Fig. 4는 키워드 간 관계와 연구주제 간 상호 연결성을 파악하여 연구분야의 핵심 및 주변 주제를 시각적으로 탐색하기에 유용한 방식이다. 예를 들어, 원(circle)은 자주 언급된 키워드를 나타내며, 삼각형(triangle)은 논문의 출판연도를 나타낸다. 분석결과 청색, 녹색, 황색으로 표시되는 “water quality”, “nitrification”, “phosphorus”, “wetlands” 등의 키워드는 서로 연결된 선으로 높은 연관성을 보여주며, 특정 주제들이 자주 함께 연구되었음을 의미한다. 이러한 분석을 통해 습지 내 질소, 인과 같은 영양염류의 거동을 주요 수질



(a) 2004–2019 ( $N = 605$ )



(b) 2020–2024 ( $N = 576$ )

Fig. 3 The contingency matrix generated the relationship of keywords and countries

분석 항목으로 수행하였다는 것을 알 수 있다. 별도 표시된 적색원에서 "antibiotics", "wastewater", "biodegradation" 키워드가 자주 나타난 것은 폐수와 항생제에 대한 연구 관심이 높아지고 있다는 것을 의미한다.

Fig. 5는 키워드의 시간적 흐름을 시각화하여 연구주제가 어느 시점에 중요해지고 감소하는지 명확히 보여줌으로써 연구분야의 연대기적 변화 이해를 도와준다. 각 키워드를 선으

로 연결하고, 그 선의 굵기나 색상으로 강조하여 데이터의 연속성을 파악할 수 있도록 하였다. 선이 두꺼울수록 키워드들이 동시에 발생할 확률이 높으며 연관성이 높다는 것을 의미한다(Breucker et al., 2016). "Wastewater & wastewater treatment", "water microbiology"의 키워드를 통해 연구 초기에 폐수처리와 관련된 미생물학적 연구가 시작되었음을 보여준다. 2013년부터 "pharmaceuticals and personal care

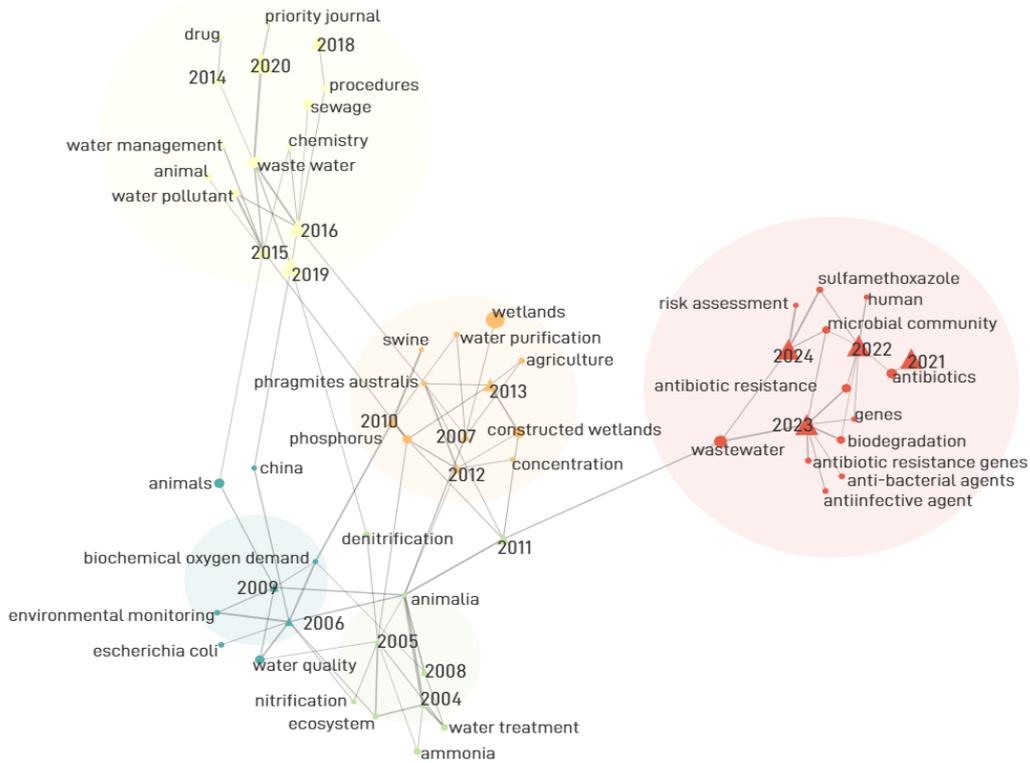


Fig. 4 The network map of keywords and years generated from CorText Manager using research articles related to constructed wetlands and antibiotics

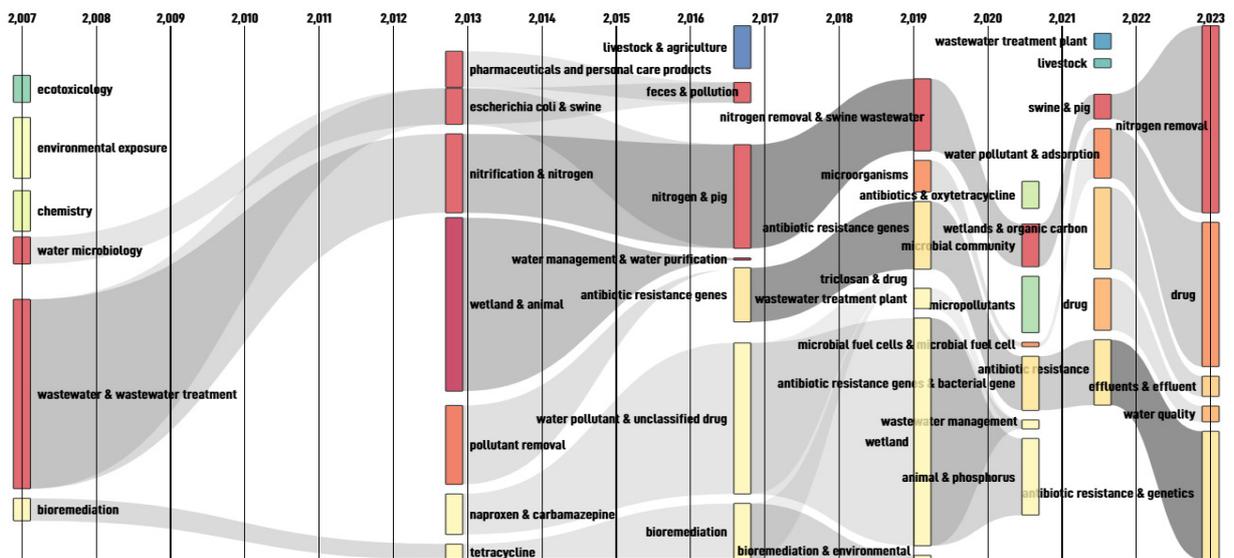


Fig. 5 Flow of keywords generated by year from CorText Manager using research articles related to constructed wetlands and antibiotics

products (PPCPs), “nitrification & nitrogen removal”, “pollutant removal”과 같은 구체적인 오염물질 및 의약품에 대한 키워드의 선이 굵어지고 색상이 강조되면서 연구가 활발히 이루어지기 시작하였다는 것을 암시한다. 특히 “wastewater”와 “nitrogen & pig” 간의 연결선이 두꺼워지며 높은 연관성을 나타내고 있으며, 이는 폐수에서 질소가 발생하는 주요 원인 중 하나로 돼지가 기여할 수 있음을 시사한다. 최신 연구동향을 살펴보면 “water pollutant”와 “drug”의 연관성이 높아지고, 항생제 관련 키워드가 급격히 증가하였다.

### 3.2 종합적 검토 결과

#### 3.2.1 수중환경 항생제 검출항목 및 빈도

계량서지학적 분석을 통해 추가된 키워드를 입력하여 논문 173편을 확보하고, 그 중 최근 출판된 논문 100편에 대하여 종합적인 문헌검토를 수행하였다. Fig. 6은 100편의 논문에서 수집 가능한 데이터를 활용하여 항생제 검출빈도를 나타낸 그림이다. 항생제는 도시 및 산업폐수와 같은 여러 공급원을 통해 수계로 유입되며 수생태계에 영향을 준다(Kümmer, 2009). 현재 다양한 종류의 항생제가 지하수, 지표수, 토양 등 다양한 지역에서 검출되고 있다(Hu et al., 2010; Stoll et al., 2012). 검출빈도 분석에서는 Tetracyclines 계열의 Oxytetracycline(OTC), Doxycycline(DOX), Chlortetracycline(CTC), Tetracycline(TC) 항생제 화합물질이 총 17.8%로 가장 높은 항생제 계열로 분류되었다. Tetracycline 계열은 주로 수의학, 인간치료, 농업 목적을 위해 사용되는 주요 항생제 그룹이며, 이 계열의 항생제를 투여할 시 70% 이상이 인간과 동물의 분뇨를 통해 환경으로 방출되는 것으로 보고되고 있다(Daghrir and Drogui, 2013). Chen 등(Chen et al., 2015)에 따르면 하일링 베이(Hailing Bay) 해역에서 Tetracyclines계열 항생제의 검출빈도가 92%로 보고하고 있다. 다음으로는 Sulfamethoxazole(SMX) 14.5%, Trimethoprim(TMP) 9.5%가 항생제 검출빈도 분석에서 높게 나타났다. Sulfamethoxazole(SMX)는 주로 기관지염 및 요로 감염치료에 사용되며, 수의학에서도 광범위하게 사용되는 합성항생제이다. 일반적으로 Trimethoprim(TMP)과 병용 처방되며, 2007년에는 캐나다에서 여섯 번째로 많이 처방된 항생제 조합이다(Cavallucci, S. 2007). 두 항생제 모두 인간과 가축에게 사용빈도가 높은 처방 항생제 중 하나이며, 다양한 지역에서 검출된 바 있다(Hu et al., 2010; McArdell et al., 2003; Metcalfe et al., 2004; Yang and Carlson, 2003). Nasuhoglu 등과 Tran 등(Nasuhoglu et al., 2011; Tran et al., 2018)에 따르면 Sulfamethoxazole(SMX) 항생제가 내성 박테리아의 확산에 기여한다고 보고하고 있다. 그러나 Drzymała와 Kalka(Drzymała and Kalka, 2020)는 Sulfamethoxazole(SMX)를 저독성 화합물로 분류하여 환경 위험성이 낮다고 보고하여 여전히 논쟁의 여지가 있는 것으로 나타났다. Clindamycin(CLI), Miconazole(MIC), Ofloxacin(OFL) 과 같은 항생제는 검출빈도가 낮음에도 불구하고, Sulfamethoxazole(SMX) 및 Trimethoprim(TMP)과 함께 생태

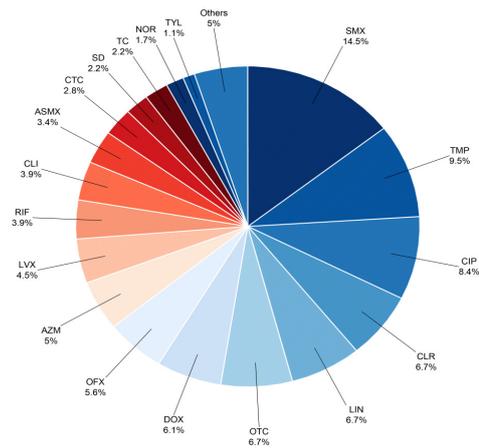


Fig. 6 Frequency of antibiotic detection from 100 reviewed studies

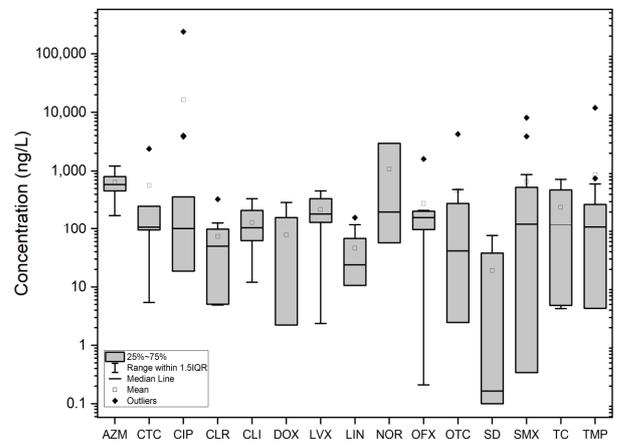


Fig. 7 Detection concentrations of antibiotics in 100 reviewed studies

독성학적 중요성을 가진 물질로 평가되어 2022년 EU 감시 목록에 포함되었다(European Commission and Directorate-General for Environment, 2022). 이러한 연구결과를 종합해 볼 때 Sulfamethoxazole(SMX)의 경우 검출빈도가 높음에도 불구하고, 환경적 위험성과 영향에 대한 연구결과는 일관되지 않음을 보여준다. 따라서 항생제가 생태계와 인체 건강에 미치는 영향을 보다 명확히 규명하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 특히 검출빈도가 높은 항생제의 환경적 의미와 잠재적 위험성에 대한 심층적 평가가 중요하다.

#### 3.2.2 수중환경 항생제 검출농도 및 제거효율 비교분석

항생제 농도는 오염수준과 항생제가 초래할 수 있는 생태적 및 인간 건강 위험을 추정하는 중요한 지표이다(Lu et al., 2020; Peng et al., 2019). 항생제 분포, 특성, 지역 규모, 소비 패턴, 검출 경로 등 잠재적 요인들로 인해 검출농도가 영향을 받는다(Chen et al., 2015). Fig. 7은 100편의 논문에서 수집 가능한 데이터를 활용하여 수중환경에서 검출된 항생제 농도분포이다. 검출농도는 하수처리장 방류수, 인공습지 유입수, 하천, 축산폐수 등 100편의 논문을 바탕으로 다양한 물환경에 검출된 데이터를 분석한 것이다. 최대 검출농도로

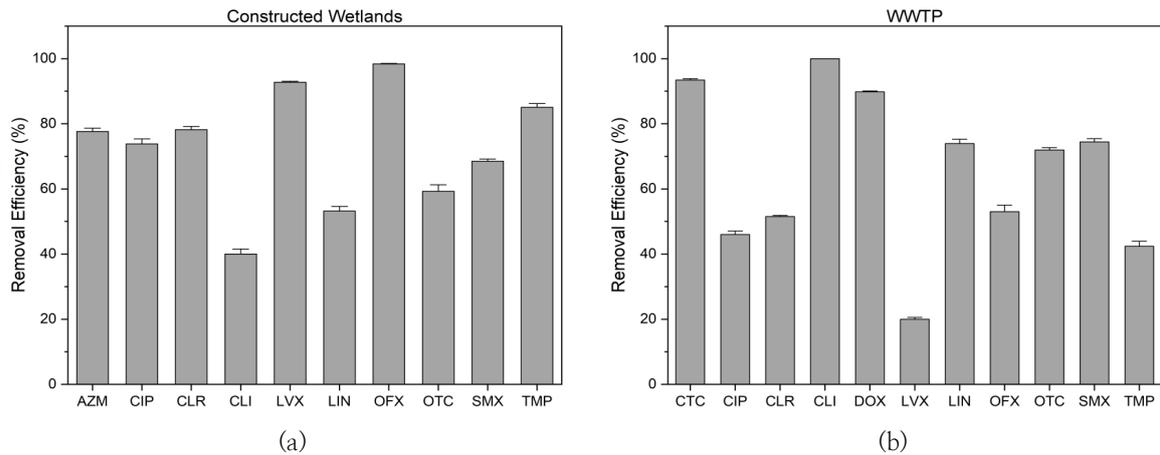


Fig. 8 Antibiotic Removal Efficiency Based on a Review of 100 reviewed studies : (a) Constructed Wetlands (b) Wastewater Treatment Plants (WWTP)

나타난 Ciprofloxacin(CIP) 항생제는 Fluoroquinolones 계열에 속하며 높은 사용량과 낮은 제거효율로 인해 환경 매트릭스에서 흔하게 검출되는 항생제이다(Khan et al., 2024; Sodhi and Singh, 2021). 제약 폐수, 도시하수, 지표수, 지하수에서 Ciprofloxacin(CIP)의 최고 농도는 31mg/L, 14mg/L, 2.5mg/L, 0.014mg/L에 달하는 것으로 나타났다(Dorival-García et al., 2013). Ciprofloxacin(CIP) 항생제는 높은 수준으로 장기간 환경에 노출되면 생태계의 건강과 신체적인 간 손상, 중추 신경계 이상과 같은 건강문제를 일으킬 수 있다(Kamal et al., 2024). 따라서 Ciprofloxacin(CIP)의 장기간 환경 잔류로 인한 육상 및 수생태계 영향을 저감하기 위하여 하수에서 Ciprofloxacin(CIP)를 제거하는 것이 중요하다(Wang et al., 2024). 가장 낮은 농도로 검출된 Sulfadiazine(SD)는 해수, 해양 침전물 및 양식 폐수에서 검출된 바 있다(Huang et al., 2016; Labella et al., 2013; Na et al., 2013). Sulfadiazine(SD)는 활성슬러지 시스템에서 질산화 과정을 억제할 수 있으며(Huang et al. 2016), 폐수처리시설의 미생물 풍부도와 다양성에 영향을 준다(Li et al., 2017). 항생제 검출농도가 낮은 미량오염물질도 지속적 검출빈도로 인하여 생태계에 잔류하게 될 경우 향후 검출농도가 높아질 가능성이 있으며 미생물 활동에 영향을 줄 수 있다.

인공습지(CWs)와 폐수처리시설(WWTP)은 항생제를 제거하지만 항생제의 생물학적 영향으로 인하여 완벽한 제거는 쉽지 않다(Joss et al., 2006). Fig. 8은 100편의 논문에서 수집 가능한 데이터를 활용하여 폐수처리시설 및 인공습지의 항생제 제거효율을 비교한 그림이다. 대체적으로 인공습지가 폐수처리시설보다 제거효율이 높으나 시설에 따라 제거되는 항생제의 화학물질이 다르다는 것을 확인할 수 있다. 특히 CWs ( $N=66$ )의 평균 제거효율은 72.7%로 WWTP ( $N=35$ )의 64.2%에 비해 높은 제거효율을 보였다. Trimethoprim(TMP)와 같은 특정 항생제는 인공습지에서 더 높은 제거효율로 관찰되었다. TMP항생제는 메탄생성균과 같은 혐기성 미생물에 의해 분해가능성이 높은 것으로 보고되고 있다

(Dan et al., 2013). 이와 같이 인공습지를 통하여 항생제를 제거하기 위해서는 분해, 흡착 또는 식물 흡입 등이 중요한 기작으로 해당한다. 그러나 화합물이 여재에 흡착되는 것은 항생제의 화학적 특성에 따라 달라지기 때문에 각 항생제의 종류마다 제거효율을 규명하기는 어렵다. 또한, 인공습지의 식생 종, 여재 종류, 기작구성 등 다양한 매개변수로 인해 유형마다 제거효율에 차이가 발생한다(Hijosa-Valsero et al., 2010).

#### 4. 결론

미량오염물질인 항생제는 환경과 생태에 다양한 영향을 주기에 처리기술에 대한 관심도가 증가하고 있다. 인공습지는 식물의 흡수, 미생물 분해, 물리적 흡착 등의 기작을 통하여 항생제 물질을 저감하는 기술이다. 따라서 본 연구에서는 자연기반해법인 인공습지의 항생제에 대한 발생 및 거동특성을 종합적으로 검토하였으며 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1) 기존 인공습지 연구는 영양염류, 중금속, 유기오염물질 등 수질 오염물질 처리에 대한 능력을 집중적으로 연구하였지만 최근 항생제, 항생제 내성률, 미생물 처리기작 등 미량오염물질에 관심이 증가하고 있는 것으로 나타났다.

2) 수중환경에서 검출된 항생제 중 Tetracyclines계열과 Sulfonamides계열의 항생제가 다른 항생제 계열보다 상대적으로 높은 수치를 보여준다. 그러나 항생제가 환경에 주는 독성 및 위험성에 대한 연구결과는 일관되지 않아 지속적인 연구가 필요한 것으로 평가하였다.

3) 생물학적 처리기술인 폐수처리시설에서 항생제 평균 제거효율은 64.2%로 나타난 반면 생태학적 처리기작을 가진 인공습지의 평균 제거효율은 72.7%로 다소 높은 처리효율을 보여주었다. 그러나 항생제 형태와 종류에 따라 제거효율은 상이하는 것으로 나타났다. 따라서 인공습지에서의 항생제 처리효율을 높이기 위해서는 항생제의 화학적 특성 규명, 인공습지의 설계방식, 토양여재 종류, 식생에 따른 다양한 연구 분석이 필요하다.

## Acknowledgements

This work was supported by Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI) through Wetland Ecosystem Value Evaluation and Carbon Absorption Value Promotion Technology Development Project, Funded by Korea Ministry of Environment (MOE)(2022003630005).

## References

- Agaton, C. B., & Guila, P. M. C. (2023). Ecosystem services valuation of constructed wetland as a Nature-Based Solution to wastewater treatment. *Earth*, 4(1), pp. 78–92. MDPI. <https://doi.org/10.3390/earth4010006>
- Anthony, E. T., Ojemaye, M. O., Okoh, O. O., & Okoh, A. I. (2020). A critical review on the occurrence of resistomes in the environment and their removal from wastewater using apposite treatment technologies: Limitations, successes and future improvement. *Environmental Pollution*, 263, pp. 1–17. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113791>
- Ávila, C., García-Galán, M. J., Borrego, C. M., Rodríguez-Mozaz, S., García, J., & Barceló, D. (2021). New insights on the combined removal of antibiotics and ARGs in urban wastewater through the use of two configurations of vertical subsurface flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 755, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142554>
- Breucker P., Cointet J., Hannud Abdo A., Orsal G., de Quatrebarbes C., Duong T., Martinez C., Ospina Delgado J.P., Medina Zuluaga L.D., Gómez Peña D.F., Sánchez Castaño T.A., Marques da Costa J., Laglil H., Villard L., Barbier M. (2016). CorTexT Manager (version v2).
- Burkhardt-Holm, P. (2011). Linking water quality to human health and environment: The fate of micropollutants. *Institute of Water Policy, National University of Singapore*, 62, pp. 1–56. <https://www.researchgate.net/publication/268328108>
- Cavallucci, S. (2007). Top 200: What's topping the charts in prescription drugs this year. Pharmacy practice, Canadian Health care Network
- Chen, H., Liu, S., Xu, X. R., Zhou, G. J., Liu, S. S., Yue, W. Z., Sun, K. F., & Ying, G. G. (2015). Antibiotics in the coastal environment of the Hailing Bay region, South China Sea: Spatial distribution, source analysis and ecological risks. *Marine Pollution Bulletin*, 95(1), pp. 365–373. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.04.025>
- Daghbir, R., & Drogui, P. (2013). Tetracycline antibiotics in the environment: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 11(3), pp. 209–227. <https://doi.org/10.1007/s10311-013-0404-8>
- Dan, A., Yang, Y., Dai, Y., Chen, C., Wang, S., & Tao, R. (2013). Removal and factors influencing removal of sulfonamides and trimethoprim from domestic sewage in constructed wetlands. *Bioresource Technology*, 146, pp. 363–370. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.050>
- Dordio, A., Carvalho, A. J. P., Teixeira, D. M., Dias, C. B., & Pinto, A. P. (2010). Removal of pharmaceuticals in microcosm constructed wetlands using *Typha* spp. and LECA. *Bioresource Technology*, 101(3), pp. 886–892. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.001>
- Drzymała, J., & Kalka, J. (2020). Ecotoxic interactions between pharmaceuticals in mixtures: Diclofenac and sulfamethoxazole. *Chemosphere*, 259, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127407>
- European Commission, Directorate-General for Environment. (2022). *Annual activity report 2022*.
- Fernandez-Fontaina, E., Omil, F., Lema, J. M., & Carballa, M. (2012). Influence of nitrifying conditions on the biodegradation and sorption of emerging micropollutants. *Water Research*, 46(16), pp. 5434–5444. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.07.037>
- Fu, J., Lee, W. N., Coleman, C., Nowack, K., Carter, J., & Huang, C. H. (2019). Removal of pharmaceuticals and personal care products by two-stage biofiltration for drinking water treatment. *Science of the Total Environment*, 664, pp. 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.026>
- Gorgoglione, A., & Torretta, V. (2018). Sustainable management and successful application of constructed wetlands: a critical review. *Sustainability*, 10(11), pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/su10113910>
- Hijosa-Valsero, M., Matamoros, V., Sidrach-Cardona, R., Martín-Villacorta, J., Bécáres, E., & Bayona, J. M. (2010). Comprehensive assessment of the design configuration of constructed wetlands for the removal of pharmaceuticals and personal care products from urban wastewaters. *Water Research*, 44(12), pp. 3669–3678. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.04.022>
- Hu, X., Zhou, Q., & Luo, Y. (2010). Occurrence and source analysis of typical veterinary antibiotics in manure, soil, vegetables and groundwater from organic vegetable bases, northern China. *Environmental Pollution*, 158(9), pp. 2992–2998. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.05.023>
- Huang, X., Feng, Y., Hu, C., Xiao, X., Yu, D., & Zou, X. (2016). Mechanistic model for interpreting the toxic effects of sulfonamides on nitrification. *Journal*

- of Hazardous Materials*, 305, pp. 123–129.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.11.037>
- Joss, A., Zabczynski, S., Göbel, A., Hoffmann, B., Löffler, D., Mc Ardell, C. S., Ternes, T. A., Thomsen, A., & Siegrist, H. (2006). Biological degradation of pharmaceuticals in municipal wastewater treatment: Proposing a classification scheme. *Water Research*, 40(8), pp. 1686–1696.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.02.014>
- Kamal, N., Saha, A. K., Singh, E., Pandey, A., & Bhargava, P. C. (2024). Biodegradation of ciprofloxacin using machine learning tools: Kinetics and modelling. *Journal of Hazardous Materials*, 470, pp. 1–12.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134076>
- Khan, H. K., Rehman, M. Y. A., & Malik, R. N. (2020). Fate and toxicity of pharmaceuticals in water environment: An insight on their occurrence in South Asia. *Journal of Environmental Management*, 271, pp. 1–19. Academic Press.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111030>
- Khan, P., Saha, R., & Halder, G. (2024). Towards sorptive eradication of pharmaceutical micro-pollutant ciprofloxacin from aquatic environment: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 919, pp. 1–37. Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170723>
- Kovalova, L., Siegrist, H., von Gunten, U., Eugster, J., Hagenbuch, M., Wittmer, A., Moser, R., & Mc Ardell, C. S. (2013). Elimination of micropollutants during post-treatment of hospital wastewater with powdered activated carbon, ozone, and UV. *Environmental Science and Technology*, 47(14), pp. 7899–7908.  
<https://doi.org/10.1021/es400708w>
- Kulik, K., Lenart-Boroń, A., & Wyrzykowska, K. (2023). Impact of antibiotic pollution on the bacterial population within surface water with special focus on Mountain Rivers. *Water* 15(5), pp. 1–25. MDPI.  
<https://doi.org/10.3390/w15050975>
- Kümmerer, K. (2009). Antibiotics in the aquatic environment – A review – Part I. In *Chemosphere*, 75(4), pp. 417–434.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.086>
- Labella, A., Gennari, M., Ghidini, V., Trento, I., Manfrin, A., Borrego, J. J., & Lleo, M. M. (2013). High incidence of antibiotic multi-resistant bacteria in coastal areas dedicated to fish farming. *Marine Pollution Bulletin*, 70(1–2), pp. 197–203.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.02.037>
- Li, Z., Chang, Q., Li, S., Gao, M., She, Z., Guo, L., Zhao, Y., Jin, C., Zheng, D., & Xu, Q. (2017). Impact of sulfadiazine on performance and microbial community of a sequencing batch biofilm reactor treating synthetic mariculture wastewater. *Bioresour Technology*, 235, pp. 122–130.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.113>
- Liu, Y., Feng, B., & Yao, Y. (2024). Research trends and future prospects of constructed wetland treatment technology in China. *Water*, 16(5), pp. 738.  
<https://doi.org/10.3390/w16050738>
- Lu, S., Lin, C., Lei, K., Wang, B., Xin, M., Gu, X., Cao, Y., Liu, X., Ouyang, W., & He, M. (2020). Occurrence, spatiotemporal variation, and ecological risk of antibiotics in the water of the semi-enclosed urbanized Jiaozhou Bay in eastern China. *Water Research*, 184, pp. 1–10.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116187>
- Mc Ardell, C. S., Molnar, E., Suter, M. J. F., & Giger, W. (2003). Occurrence and fate of macrolide antibiotics in wastewater treatment plants and in the Glatt Valley Watershed, Switzerland. *Environmental Science and Technology*, 37(24), pp. 5479–5486.  
<https://doi.org/10.1021/es034368i>
- Metcalf, C., Miao, X. S., Hua, W., Letcher, R., & Servos, M. (2004). Pharmaceuticals in the Canadian environment. *Pharmaceuticals in the environment: sources, fate, effects and risks*, pp. 67–90. Springer Berlin Heidelberg.
- Na, G., Fang, X., Cai, Y., Ge, L., Zong, H., Yuan, X., Yao, Z., & Zhang, Z. (2013). Occurrence, distribution, and bioaccumulation of antibiotics in coastal environment of Dalian, China. *Marine Pollution Bulletin*, 69(1–2), pp. 233–237.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.12.028>
- Nasuhoglu, D., Yargeau, V., & Berk, D. (2011). Photo-removal of sulfamethoxazole (SMX) by photolytic and photocatalytic processes in a batch reactor under UV-C radiation ( $\lambda_{max}=254nm$ ). *Journal of Hazardous Materials*, 186(1), pp. 67–75.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.10.080>
- Nguyen, M.-K., Lin, C., Bui, X.-T., Rakib, M. R. J., Nguyen, H.-L., Truong, Q.-M., Hoang, H.-G., Tran, H.-T., Malafaia, G., & Idris, A. M. (2024). Occurrence and fate of pharmaceutical pollutants in wastewater: insights on ecotoxicity, health risk, and state-of-the-art removal. *Chemosphere*, 354, pp. 1–16.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141678>
- Peng, Q., Song, J., Li, X., Yuan, H., Li, N., Duan, L., Zhang, Q., & Liang, X. (2019). Biogeochemical characteristics and ecological risk assessment of pharmaceutically active compounds (PhACs) in the surface seawaters of Jiaozhou Bay, North China. *Environmental Pollution*, 255, pp. 1–12.

- <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113247>
- Rahman, M. E., Halmi, M. I. E. bin, Samad, M. Y. B. A., Uddin, M. K., Mahmud, K., Shukor, M. Y. A., Abdullah, S. R. S., & Shamsuzzaman, S. M. (2020). Design, operation and optimization of constructed wetland for removal of pollutant. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(22), pp. 1–40. MDPI AG.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph17228339>
- Resende, J. D., Nolasco, M. A., & Pacca, S. A. (2019). Life cycle assessment and costing of wastewater treatment systems coupled to constructed wetlands. *Resources, Conservation and Recycling*, *148*, pp. 170–177.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.034>
- Rizzo, L., Manaia, C., Merlin, C., Schwartz, T., Dagot, C., Ploy, M. C., Michael, I., & Fatta-Kassinos, D. (2013). Urban wastewater treatment plants as hotspots for antibiotic resistant bacteria and genes spread into the environment: A review. *Science of the Total Environment*, *447*, pp. 345–360.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.032>
- Sodhi, K. K., & Singh, D. K. (2021). Insight into the fluoroquinolone resistance, sources, ecotoxicity, and degradation with special emphasis on ciprofloxacin. *Journal of Water Process Engineering*, *43*, pp. 1–11. Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102218>
- Stoll, C., Sidhu, J. P. S., Tiehm, A., & Toze, S. (2012). Prevalence of clinically relevant antibiotic resistance genes in surface water samples collected from Germany and Australia. *Environmental Science and Technology*, *46*(17), pp. 9716–9726.  
<https://doi.org/10.1021/es302020s>
- Tran, N. H., Reinhard, M., & Gin, K. Y. H. (2018). Occurrence and fate of emerging contaminants in municipal wastewater treatment plants from different geographical regions—a review. *Water Research*, *133*, pp. 182–207. Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.029>
- Turhan, N. S. (2020). Karl Pearson's Chi-Square Tests. *Educational Research and Reviews*, *16*(9), 575–580.  
<http://dx.doi.org/10.5897/ERR2019.3817>
- Wang, B. Q., Xu, Z., & Dong, B. (2024). Occurrence, fate, and ecological risk of antibiotics in wastewater treatment plants in China: A review. *Journal of Hazardous Materials*, *469*, pp. 1–15. Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133925>
- Włodarczyk-Makuła, M., Popenda, A., & Wiśniowska, E. (2021). Removal of emerging contaminants and endocrine disrupting compounds from wastewater in the aspect of water protection. *International Journal of Conservation Science*, *12*, pp. 731–744.
- Yang, Q., Gao, Y., Ke, J., Show, P. L., Ge, Y., Liu, Y., Guo, R., & Chen, J. (2021). Antibiotics: an overview on the environmental occurrence, toxicity, degradation, and removal methods. *Bioengineered*, *12*(1), pp. 7376–7416.  
<https://doi.org/10.1080/21655979.2021.1974657>
- Yang, S., & Carlson, K. (2003). Evolution of antibiotic occurrence in a river through pristine, urban and agricultural landscapes. *Water Research*, *37*(19), pp. 4645–4656.  
[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00399-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00399-3)