

## COVID-19 팬데믹에 따른 이산화탄소 배출 및 블루카본 흡수량 영향

권인하<sup>1</sup> · 이종민<sup>2</sup> · 송현서<sup>1</sup> · 박신영<sup>1</sup> · 김태우<sup>2</sup> · 김종성<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 지구환경과학부 대학원생

<sup>2</sup>서울대학교 블루카본사업단 연수연구원

<sup>3</sup>서울대학교 지구환경과학부 교수

### Review on the Impact of COVID-19 Pandemic on Change of CO<sub>2</sub> Emission and Blue Carbon

Inha Kwon<sup>1</sup>, Jongmin Lee<sup>2</sup>, Hyunseo Song<sup>1</sup>, Shin Yeong Park<sup>1</sup>, Taewoo Kim<sup>2</sup>, and Jong Seong Khim<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, School of Earth and Environmental Sciences & Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

<sup>2</sup>Post-doctoral fellow, Blue Carbon Research Center, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

<sup>3</sup>Professor, School of Earth and Environmental Sciences & Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

#### 요 약

블루카본 생태계(Blue carbon ecosystems, BCEs)는 탄소 중립을 달성하기 위한 맹그로브 숲, 잘피 숲, 염습지를 포함하고 최근 지구온난화로 인한 기후변화에 큰 영향을 주는 높은 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 흡수하는 탄소흡수원의 역할로 부각되고 있다. 기존 연구들은 CO<sub>2</sub> 흡수원의 역할에 대해 많은 연구가 진행되었으나, 현재 COVID-19 팬데믹으로 인한 해양환경변화에 대한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 COVID-19 팬데믹 전후로 “블루카본”과 관련된 연구 키워드를 비교하여 블루카본 연구 동향을 확인하였으며 전세계 발전소 및 산업활동을 통한 CO<sub>2</sub> 배출량을 비교하였다. COVID-19 팬데믹 이후 러시아(18%)에서 CO<sub>2</sub> 배출량이 증가한 반면 영국(17%)에서는 CO<sub>2</sub> 배출량이 감소했다. 전세계적으로는 화석 CO<sub>2</sub> 배출량(E<sub>FOS</sub>)과 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도(G<sub>ATM</sub>)는 팬데믹 이후 감소하였으며, 해양생태계 CO<sub>2</sub> 흡수량과 화석 CO<sub>2</sub> 배출량( $p < 0.001$ ) 그리고 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도( $p < 0.001$ )와 유의한 양의 상관관계를 보였다. 또한 블루카본 생태계의 탄소 잠재량 분석 결과, 블루카본 생태계 중 맹그로브 숲의 맹그로브 나무(20.8 Gt CO<sub>2</sub>)와 퇴적물(0.03 Gt CO<sub>2</sub>)이 가장 높은 탄소 흡수원으로 나타났다. 해저지형 중에서는 해연/해저분지(6.76 Gt CO<sub>2</sub>)에서 가장 높은 탄소 잠재량을 확인하였다. 전세계적으로 COVID-19 팬데믹에 따른 국경봉쇄, 이동제한 그리고 산업활동의 감소는 대기중 CO<sub>2</sub> 배출량(5%)을 감소시켰으며, 해양으로 흡수량(1%)은 증가한 것으로 보인다. COVID-19 팬데믹 이후 전세계 총 탄소 수치(5.5%)는 감소하였다. 본 연구 결과는 COVID-19 팬데믹으로 생긴 사회적 제약에 따른 CO<sub>2</sub> 배출과 블루카본에 대한 데이터를 확립해야 할 필요성을 다루며, 전세계적으로 블루카본 생태의 중요성을 강조한다.

**Abstract** – Blue carbon ecosystems (BCEs), including mangrove forests, seagrass meadows, and salt marshes, have been highlighted as efficient carbon sinks under global warming. Previous BCEs studies have focused on the role of CO<sub>2</sub> sinks, yet the effects of the COVID-19 pandemic on these ecosystems lack. Here we show, the public perceptions and research directions of blue carbon, and a review to compare the pre- and present effects of the COVID-19 pandemic on changes of CO<sub>2</sub> emission and blue carbon, globally. Results showed that CO<sub>2</sub> emissions increased in Russia (18%) during the COVID-19 pandemic whereas CO<sub>2</sub> emissions decreased in England (17%). Globally, fossil emissions (E<sub>FOS</sub>) and atmospheric growth (G<sub>ATM</sub>) decreased after the pandemic. Also, ocean sink showed significant correlation to both fossil emission ( $p < 0.001$ ) and atmospheric growth ( $p < 0.001$ ). Among the BCEs, mangrove forests showed the largest carbon sink in both their biomass (20.8 Gt CO<sub>2</sub>) and sediment (0.03 Gt CO<sub>2</sub>). Among ocean provinces, the largest carbon sink was the abyssal/basin (6.76 Gt CO<sub>2</sub>). Furthermore, due to the COVID-19 pandemic, governments have implemented lockdown protocols in numerous counties around the

<sup>†</sup>Corresponding author: jskocean@snu.ac.kr

world, resulting in the reduction of CO<sub>2</sub> emission (5%) in the atmosphere with growth in ocean sinks (1%). The effects of enforced lockdowns of varying stringency in response to the pandemic have led to a gross reduction in global carbon level (5.5%). Overall, the study addresses the need to establish data on CO<sub>2</sub> emission and blue carbon during the COVID-19 era and emphasizes the importance of blue carbon ecosystems, globally.

**Keywords:** Blue carbon(블루카본), COVID-19(코로나-19), CO<sub>2</sub> emission(이산화탄소 배출), Marine environment(해양환경), Blue carbon ecosystems(블루카본 생태계), Ocean sink(해양흡수)

## 1. 서 론

현재 COVID-19 팬데믹은 전세계적으로 많은 변화를 가져왔다. 2019년 12월 중국 우한시에서 첫 발병 사례가 나온 이후 급속도로 전세계에 퍼져나갔으며, UN 산하의 세계보건기구(WHO)는 사태의 심각성을 알리고자 2020년 3월 11일에 COVID-19를 공식적인 팬데믹으로 선언하여 전세계적으로 방역에 주의할 것을 당부했다. 이러한 조치는 전세계적으로 COVID-19의 전파를 막기 위한 사회활동의 제한 및 이동 감소로 이어졌으며, 그 결과로 경제, 문화, 사회, 기술 등 많은 분야에서 변화가 나타났다(Chakraborty and Maity [2020]; Singh and Singh[2020]). COVID-19 팬데믹이 가져온 인간활동의 변화는 사회 다방면으로 긍정적·부정적인 결과를 이끌었다(Verma and Prakash[2020]). 예를 들어, 사회활동의 제약으로 인해 대기오염이 감소하고 보호대상 조류들이 다시 목격되는 등 환경에 긍정적인 변화(Feng *et al.*[2022]; Verma and Prakash[2020])가 보고된 바 있다. 반면, 개인위생용품 및 일회용품 사용 증가로 해양에 유입되는 쓰레기 양이 증가하는 부정적인 영향도 보고되었다(Jiang *et al.*[2022]; Peng *et al.*[2021]). 이처럼 COVID-19 팬데믹은 여러 방면에서 과거와 달라진 환경 변화의 원인이 되었으며 급격히 변화하는 환경과 COVID-19 시기에 맞는 관리체계가 미흡하여 그 필요성이 제기되고 있다(Barouki *et al.*[2021]; Espejo *et al.*[2020]).

블루카본 생태계는 대기로부터 탄소를 격리하여 기후변화의 원인 중 하나인 온실가스를 감축함으로써 기후변화 속도를 줄여줄 중요한 생태계로 각광받고 있다. 뿐만 아니라, 해일 및 풍파로부터 해안선 보호 및 서식지 제공을 통한 생물 다양성 증가 등 블루카본 생태계가 가지는 잠재력은 다양한 것으로 평가받고 있다(Duarte *et al.*[2013]; Walton *et al.*[2006]). COVID-19 팬데믹이 가져온 국제사회의 제재 조치와 산업활동의 감소는 CO<sub>2</sub> 배출양상 변화(Friedlingstein *et al.*[2020])와 사회경제적 변화(Jiang *et al.*[2022])를 가져왔으며, 해양생태계에 큰 영향(Andrijevic *et al.*[2020])을 끼쳤다. 그럼에도 불구하고, COVID-19 팬데믹으로 인한 블루카본 연구는 미흡한 실정이다. 이처럼 COVID-19 팬데믹에 따른 환경 변화를 적용한 블루카본 정책과 가이드라인의 필요성이 제기되면서 그 어느때보다 COVID-19 팬데믹에 따른 전세계 CO<sub>2</sub> 배출량 및 블루카본 흡수량에 대한 연구가 요구되고 있다.

본 연구는 리뷰를 통해 (1) COVID-19 팬데믹 전후로 “블루카본”에 대한 키워드의 빈도수를 조사하였고; (2) COVID-19가 가져온 블루카본 연구 동향의 변화를 파악하였으며; (3) COVID-19 팬데믹에 따른 국가별 CO<sub>2</sub> 배출량 변화를 분석하였고; (4) COVID-19

팬데믹에 따른 전세계 CO<sub>2</sub> 배출 및 블루카본 흡수량 변화를 비교하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 사회적 인식 변화

본 논문은 Google trend와 Naver datalab을 사용하여 2004년부터 2022년까지의 “블루카본”에 대한 키워드 검색량을 조사하였고 COVID-19 팬데믹의 시작점인 2019년 12월을 기준으로 차이를 비교하였다. 국외 키워드의 빈도수는 Google을 통해 집계하였고 국내의 경우 한국에서 가장 많이 사용하는 검색엔진인 Naver를 활용하였다. 키워드 빈도수는 특정 지역과 시간대 사이로 분류한 데이터로 상대적인 인기도를 총 검색결과에 반영하였다. 반영된 총 검색결과 중 키워드의 검색된 빈도를 계산하여 1에서 100까지의 비율로 나타냈다. 각 데이터는 키워드의 빈도수 데이터가 제공되는 연도부터 2022년까지의 데이터를 사용하였다. Google과 Naver는 각각 2004년과 2016년 데이터부터 사용했다.

### 2.2 메타데이터 수집

본 연구는 Scopus 검색(키워드: “COVID-19”와 “Blue carbon”)을 통해 2018년부터 2020년까지 출간된 문헌을 수집하였다. VOS (Van Eck and Waltman, Leiden University, Leiden, The Netherlands; 195 version 1.6.10) 뷰어는 대형 서지 지도를 표시하고 과학 출판물, 저널, 연구 키워드 및 용어별로 네트워크를 구성하는 데 유용한 도구이다(van Eck and Waltman[2010]). 또한 특정 단어 또는 키워드들이 함께 중복되어 검색될수록 각 키워드 간의 네트워크(관계)가 굵게 나타나며 이를 통해 상대적 연결성을 정량적으로 확인할 수 있는 분석기법이다. 네트워크 분석을 위해 Scopus 검색을 통해 수집된 문헌들의 발행 연도, 키워드, 문서 유형, 초록 및 CSV 형식을 수집하였다. 이때 수집된 2,777,574개의 논문 및 보고서는 제목과 초록 내 키워드와 빈도수에 따른 키워드 간의 관계도를 확인하였다(van Eck and Waltman[2010]). 그리고 COVID-19 발생 전후 키워드를 포함한 논문을 수집하여 COVID-19가 블루카본 연구에 끼친 영향을 조사하였다. 이때 최소 중복 키워드를 5 이상으로 두었으며, COVID-19 팬데믹 이전에는 총 358의 키워드가 검색되었고, COVID-19 팬데믹 이후에는 총 432개의 키워드가 이를 충족했다(Fig. 2).

블루카본 생태계(BCEs) 평가하기에 앞서 COVID-19 팬데믹에 따른 전세계 CO<sub>2</sub> 배출량 및 블루카본 흡수량을 확인하였다. COVID-

19 발생 시점 전후로 전세계 산업/전력 활동에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량 및 해양환경의 탄소 흡수량 변화를 확인하고자 국제 CO<sub>2</sub> 배출 모니터링 데이터를 사용하였다. 대표적으로 중국, 러시아, 일본, 인도, 미국, 유럽 내 산업 및 발전소에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량 데이터를 비교하였고 2019-2020년 사이의 데이터를 사용하여 COVID-19 팬데믹에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량 변화를 확인하였다(ICOS[2021]). COVID-19에 따른 전세계 CO<sub>2</sub> 배출량 변화를 확인하기 위해, 과거 기간(1850-2020년) 동안 전세계 탄소 예산 데이터(Friedlingstein *et al.*[2020])를 사용하였다. 이를 통해 COVID-19 팬데믹 이후 “블루카본”에 대한 대중의 관심(검색 빈도)과 연구 동향을 확인하였고, COVID-19로 인해 달라진 환경변화에 따른 전세계 CO<sub>2</sub> 배출량 및 해양환경의 탄소 잠재량(블루카본 생태계와 해저지형)을 평가하였다.

### 2.3 통계 분석

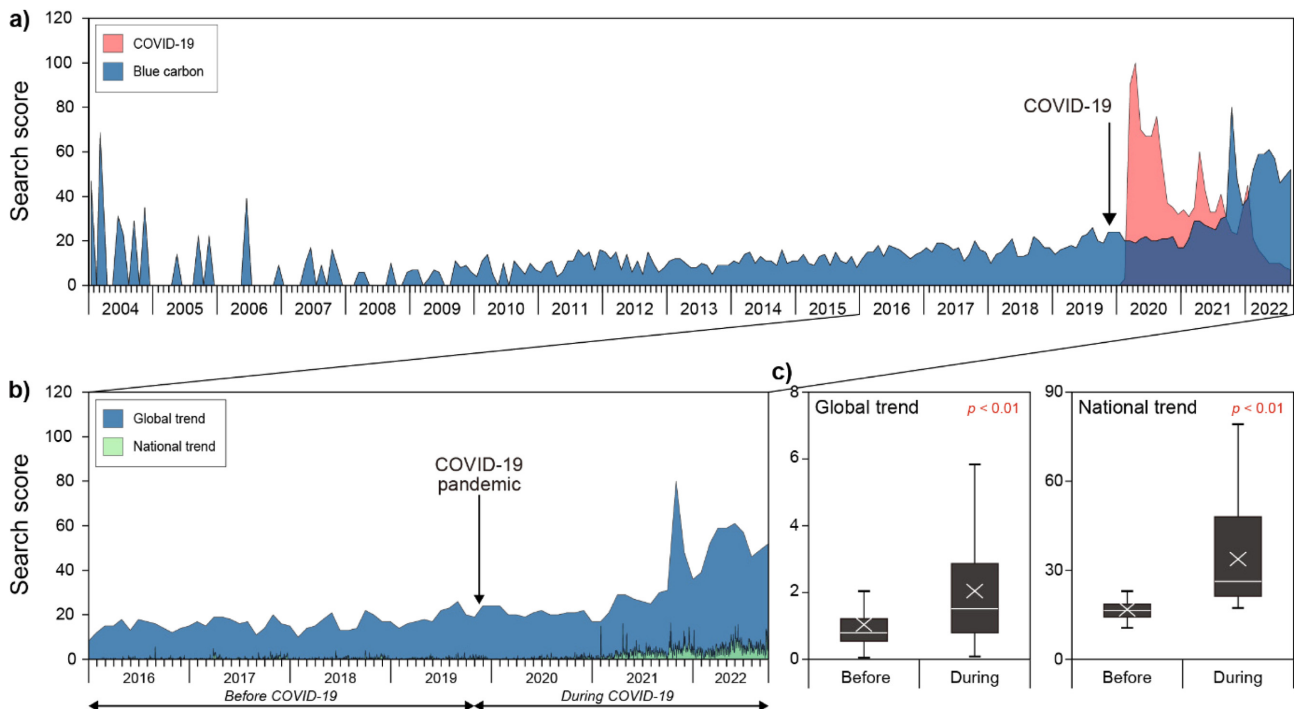
COVID-19 팬데믹 전후에 따른 해양흡수를 확인하기 위해 *t*-test를 수행했으며, pearson 상관 분석을 통해 화석 CO<sub>2</sub> 배출량과 해양생태계 CO<sub>2</sub> 흡수량 그리고 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도와의 관계를 확인하고자 하였다. *t*-Test와 pearson 상관 분석은 SPSS 23.0(SPSS Inc., Chicago, IL)을 통해 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 COVID-19 팬데믹에 따른 “블루카본” 검색 빈도수 변화

Google trend를 통해 전세계의 키워드 검색 빈도수를 확인한 결과,

“COVID-19”에 대한 검색 빈도수는 2019년 이후 가장 높은 점수가 나타났으나, 이후 감소하여 2020년 초에 “블루카본”보다 검색 빈도수보다 8점 낮았다. 한편 “기후변화”에 대한 검색 빈도수는 2007년과 2010년에는 20점 미만으로 나타났으며, 전체적으로 10 점대를 유지하는 것으로 나타났다. “블루카본”에 대한 검색 빈도수는 2009년 이후로 점차 증가하는 추세를 보였으며, 2015년까지 검색 점수는 20점 미만으로 유지되었다. COVID-19 팬데믹 발생 이전인 2016년도와 2019년도 사이에는 증가하는 것으로 나타난 반면, COVID-19 팬데믹 발생 이후 2021년부터 “블루카본”에 대한 검색 빈도수는 과거보다 급격히 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 1a). 국내의 검색 빈도수를 비교한 결과, “블루카본”에 대한 국외의 검색 빈도수는 국내의 검색 빈도수 보다 높게 나타났다(Fig. 1b). 2020년 후반부터 “블루카본”에 대한 검색 빈도수는 국내외 모두 증가하는 경향을 보이며, 한국의 경우에도 2021년도 초에 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 국내에서의 “블루카본”에 대한 검색 빈도수는 과거에는 5점 미만이었으나, 2021년 이후에 관심이 증가하면서 검색 빈도수 또한 10점으로 기존에 비해 약 2배 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 1b). 국외에서도 역시 2021년 이후 20점에서 40점으로 2 배가량 증가하면서 국내와 동일한 경향을 보였다(Fig. 1b). COVID-19 팬데믹 전후로 전세계와 국내 키워드 검색 빈도수는 유의한 차이를 보였으며( $p < 0.01$ ), 2021년 이후 블루카본에 대한 관심이 증가한 것으로 확인되었다(Fig. 1c). 이러한 경향성은 COVID-19 사태로 인한 대중의 관심사 변화에 따른 것으로 보인다. 코로나바이러스(SARS-CoV-2)는 주로 호흡을 통해 주로 확산이 되며, 현재



**Fig. 1.** Temporal development of a cumulative number of recent trends estimated as search score for a) “COVID-19” and “blue carbon” using Google trend, b) and comparison of “blue carbon” trends global and national (South Korea). c) Global and national comparison of “Blue carbon” search scores before and during COVID-19 pandemic.

까지 약 753 백만 명이 감염되었고 그중 6 백만 명이 사망한 것으로 세계보건기구(WHO)에서 발표하였다. 이러한 결과는 주변 환경과 건강에 대한 관심으로 이어진 것으로 보인다(Rubaltelli *et al.*[2020]). 특히, 코로나로 인해 급격히 변하는 대기오염 등 환경(Adam *et al.*[2021]; Barouki *et al.*[2021]; Mahato *et al.*[2020]; Tobias *et al.*[2020])과 블루카본에 대한 관심이 증가하면서 이와 관련된 키워드의 검색 빈도수 또한 증가하는 것으로 보인다. 또한 COVID-19 사태로 기후변화의 심각성에 대한 인식이 확대되면서 전세계적으로 2050 탄소중립을 목표로 “장기 저탄소 발전전략”과 “2030년까지 자체적으로 온실가스감축목표”를 세웠다. 2021년 10 월에는 국무회의에서 “2050 탄소중립 시나리오”와 “2030 국가 온실가스 감축목표”이 심의·확정되었다. 이로 인해 주요국의 탄소중립 선언이 가속화되면서, 대중의 인식에도 변화가 나타난 것으로 보인다.

### 3.2 COVID-19에 따른 블루카본 연구동향

COVID-19 팬데믹이 발생한 이후 4년간 “COVID-19”와 관련된 연구논문을 비교하였다(Fig. 2a). 그 결과, “COVID-19” 연구는 크게 4개 그룹(링크: 146,492개)으로 나누어졌다. Group A는 남성(male), 호흡율(breathing rate), 환기(ventilation) 산소포화도(oxygen saturation), Group B는 코로나바이러스(sars-Cov-s), 호흡증후군(respiratory syndrome), 절차(procedures), 비인간(nonhuman), Group C는 이산화탄소(carbon dioxide), 탄소 배출(carbon emission), 대기질(air quality), 물질(particulate matter). Group D는 여성(female), 주요 임상연구(major clinical study), 탄소 확산능력(diffusing capacity for carbon), 폐 기능 저하(lung function/disease severity)로 나타났다. Group B는 주로 코로나로 인한 감염증을 다루며, 특히 중등 호흡기 증후군과 같은 신종 베타코로나 바이러스 감염증에 대한 연구로 보인다. Group A 와 D 같은 경우 성별에 따른 사망률에 대한 연구로 보인다. 실제로 최근 연구에 따르면 젊은 남성이 여성에 비해 사망률이 높은 것으로 나타났다(Ma *et al.*[2022]). 반면, Group C는 COVID-19 팬데믹에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량 변화를 주로 포함한다(Fig. 2a). 실제로 COVID-19 팬데믹으로 인해 제2차 세계대전 이후로 CO<sub>2</sub> 배출량이 가장 많이 감소한 것으로 보고된 바 있다(IEA[2021]).

COVID-19 팬데믹 전(2018–2019년)과 후(2020–2022년)의 네트워크 분석을 통해 블루카본 연구의 동향을 확인할 수 있었다(Fig. 2b). 블루카본 연구의 흐름은 대체로 팬데믹 이전에 급증하는 CO<sub>2</sub> 배출량의 감축을 위한 방안으로 블루카본 생태계(BCEs)가 대두되었으며, 맹그로브 숲, 염습지 그리고 잘피 숲이 주된 대상이었다(Atwood *et al.*[2017]). 2020년대 후반 들어 블루카본 생태계의 평가와 신규탄소원 발굴을 위한 항목으로 “탄소저장(carbon storage)”과 “생태계(ecosystem)”의 키워드 순위가 각각 7단계, 5단계 증가하였으며, “갯벌(tidal flat)”과 같은 최근 연구 키워드 또한 증가하였다(Fig. 2b). “탄소저장(carbon storage)”와 “생태계(ecosystem)” 연구가 증가하면서 환경변화와 국제정책에 따른 해양생태계의 BCEs 감

재량에 대한 평가가 주된 연구로 자리잡았다(Chen and Lee[2022]; Lee *et al.*[2021]). 특히, 2020년에 탄소 인증 기준(Verra: verified carbon standard)에서 최초로 국제 온실가스 감축에 대한 블루카본 보존 방법론을 발표하였다. 발표된 블루카본 보존 방법론은 해안 복원 및 보존 활동을 위한 제도개선이 이루어질 것으로 보인다. 국내에서는 블루카본 잠재량 측정을 위해 현장 데이터와 원격탐사 기법을 통해 한국 갯벌의 총 탄소 잠재량을 평가(Lee *et al.*[2021])하며 국내 갯벌의 중요성을 강조하였다. 종합적으로 블루카본 연구 방향성에 따른 주요 정책 및 BCEs 연구가 앞으로 탄소중립에 중요한 로드맵이 될 것으로 보인다(Macreadie *et al.*[2019]).

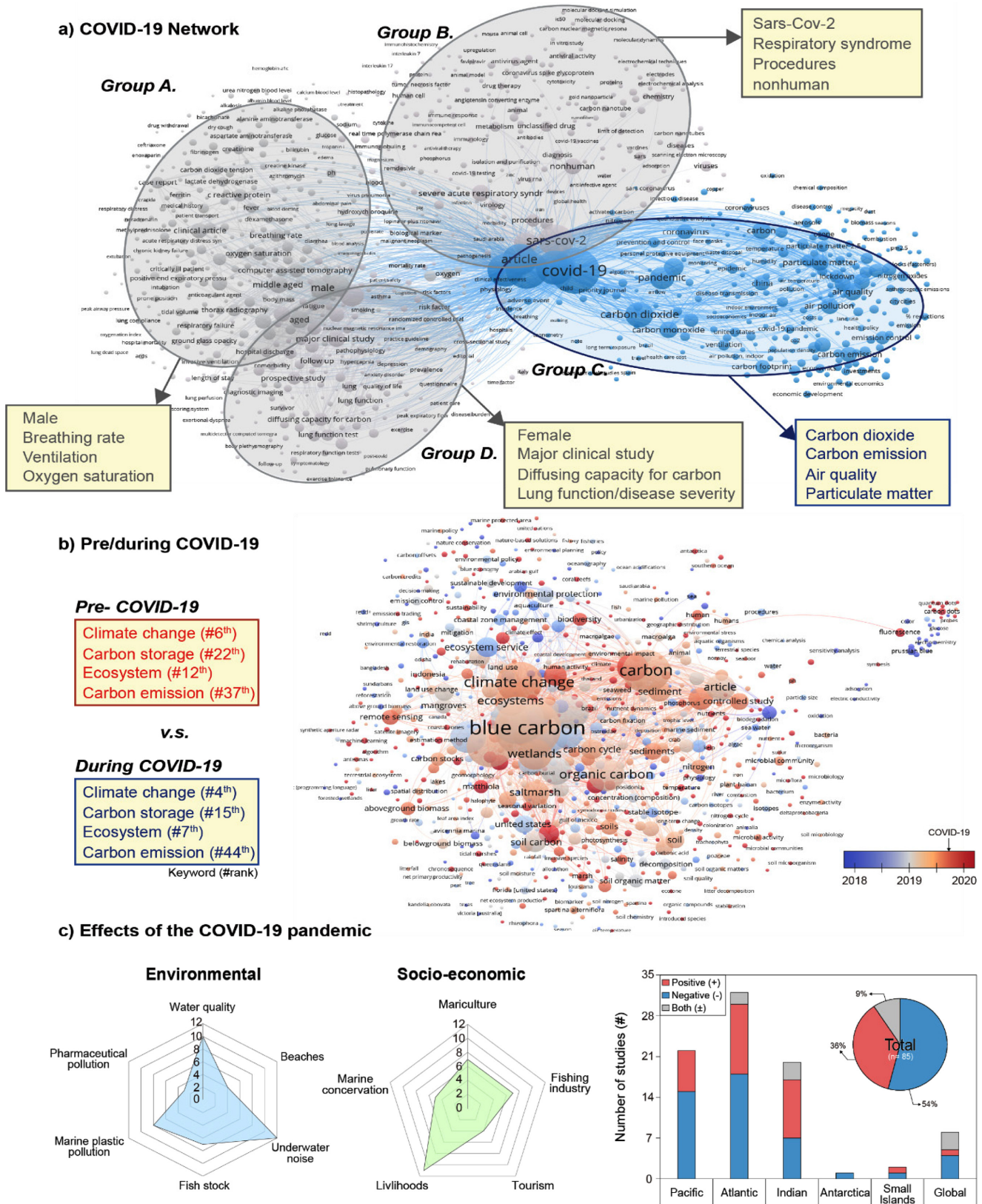
COVID-19에 의한 해양환경의 긍정적 및 부정적 영향을 확인하기 위해 총 85건의 논문을 리뷰하였다(Fig. 2c). 그 결과, 환경(environmental) 영향을 조사한 논문은 총 35건으로 나타났으며 소음진동 영향에 대한 연구가 12건으로 가장 많았다. 사회경제(socio-economic)에 대한 논문은 총 33건으로 생계(livelihoods)에 대한 내용이 주된 연구 주제였다(11건). 전체 연구의 36%(n=31)가 COVID-19 팬데믹의 긍정적인 영향(+)과 관련이 있는 반면 연구의 54%(n=46)는 부정적인 영향(-)에 중점을 두고 있으며, 두 영향(±)을 모두 보인 연구는 9%(n=8)로 나타났다. 또한 해역별로는 대서양(n=32)에서 가장 많은 연구가 수행되었으며, 남극에서는 1건만이 보고되었다. COVID-19 팬데믹이 해양환경에 미치는 영향은 주로 인구가 밀집한 해역에서 주로 나타나는 것으로 판단된다.

### 3.3 COVID-19에 따른 전세계 CO<sub>2</sub> 배출 변화

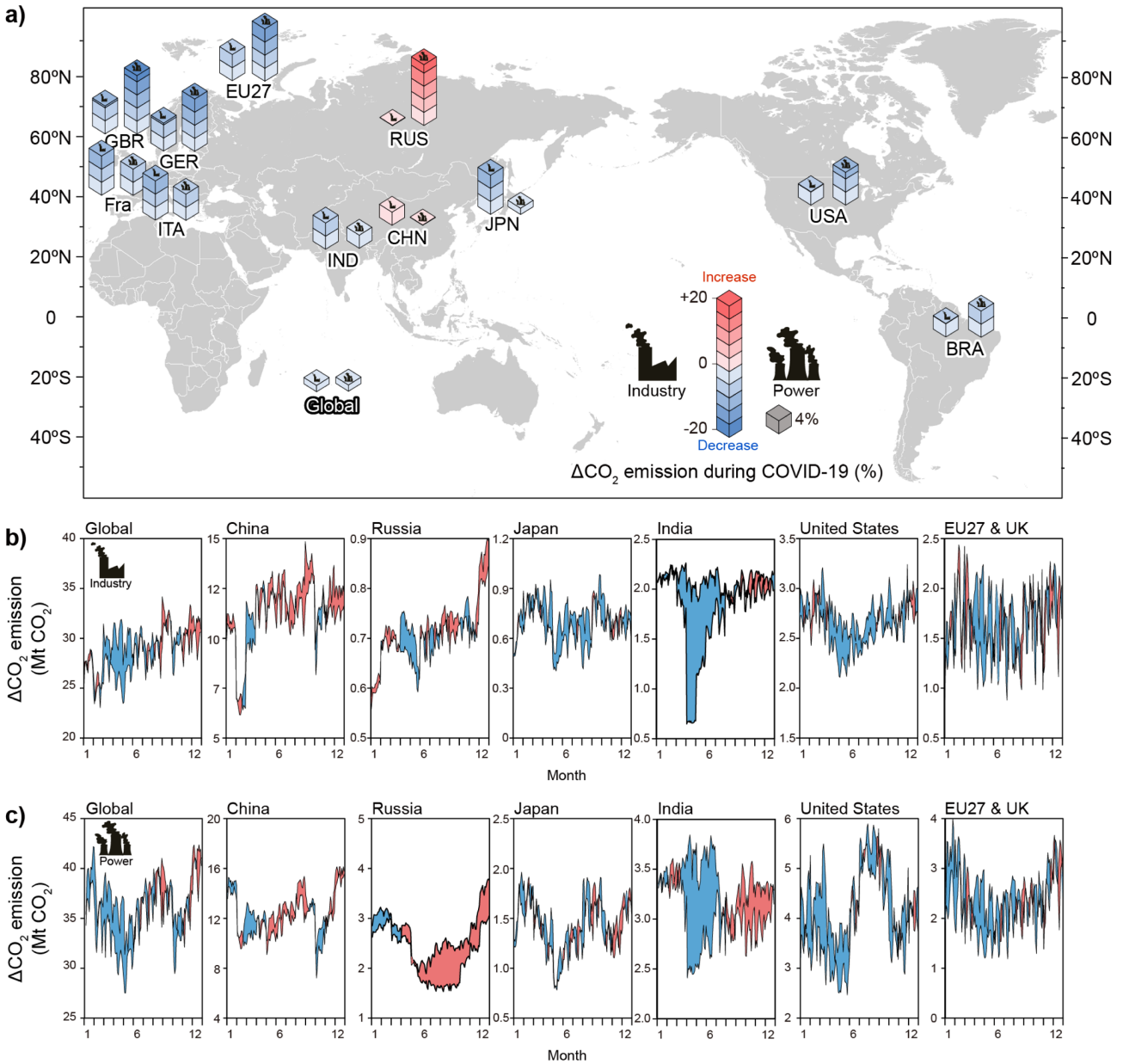
2019년과 2020년 사이 발전소(화력 발전소, 원자력 발전소 등)와 산업활동(건설활동, 공장 생산활동 등)에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량을 비교한 결과, 전세계적으로 발전소와 산업활동으로 인해 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량은 감소하는 것으로 나타났다. 전세계 발전소에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량 감소로 인해 약 458.03 Mt CO<sub>2</sub>의 탄소가 절감되었으며, 전년 대비 총 배출량이 3.39%가 감소하였다(Fig. 3a). 따라서 대부분의 나라에서 전년 대비 온실가스 배출량이 줄었으며 2020년에는 대체로 전년 대비 더 많은 양의 CO<sub>2</sub> 배출량이 감소한 것으로 나타났다. 발전소와 산업활동에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량의 월별 변화를 확인하였을 때, 인도에서 가장 높은 감소율을 보였다. 특히, 산업활동에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량은 3월에 최대 2 Mt CO<sub>2</sub> 감소량을 보였고 발전소에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량은 3.4 Mt CO<sub>2</sub> 감소로 나타났으며 각각 12.67% 와 4.70%의 감소율을 보였다. 영국을 포함한 유럽 지역에서 최대 CO<sub>2</sub> 배출량 감소율을 보이며, 산업활동에서는 48.74 Mt CO<sub>2</sub>, 발전소에서는 126.25 Mt CO<sub>2</sub>가 감소하였다. 이는 전년 대비 각각 7.71%와 13.52%의 감소율로 다른 나라들에 비해 높게 나타났다. 미국과 일본에서 산업활동에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량은 각 46.4 Mt CO<sub>2</sub>(4.64%), 164.17 Mt CO<sub>2</sub>(4.59%) 감소하였고, 발전소에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량은 각각 169.56 Mt CO<sub>2</sub>(10.56%)와 8.33 Mt CO<sub>2</sub>(1.59%) 감소하였으며 이는 COVID-19으로 국경봉쇄, 이동제한 등으로 인한 사회 및 경제활동의 위축에 의한 것으로 보인다(Fig. 3).

러시아와 중국의 경우는 COVID-19 팬데믹 이후 발전소와 산업





**Fig. 2.** Keyword network based on co-occurrence analysis. a) literature-based full network analysis of “COVID-19”, b) network transition of “Blue carbon” between pre- and during- COVID-19 pandemic, where the size of the node shows the frequency of occurrences in literature-based full network analysis. c) A cumulative number of publications assessing the effects (positive: +, negative: -, both: ±) of the COVID-19 pandemic in environmental and socio-economic areas.



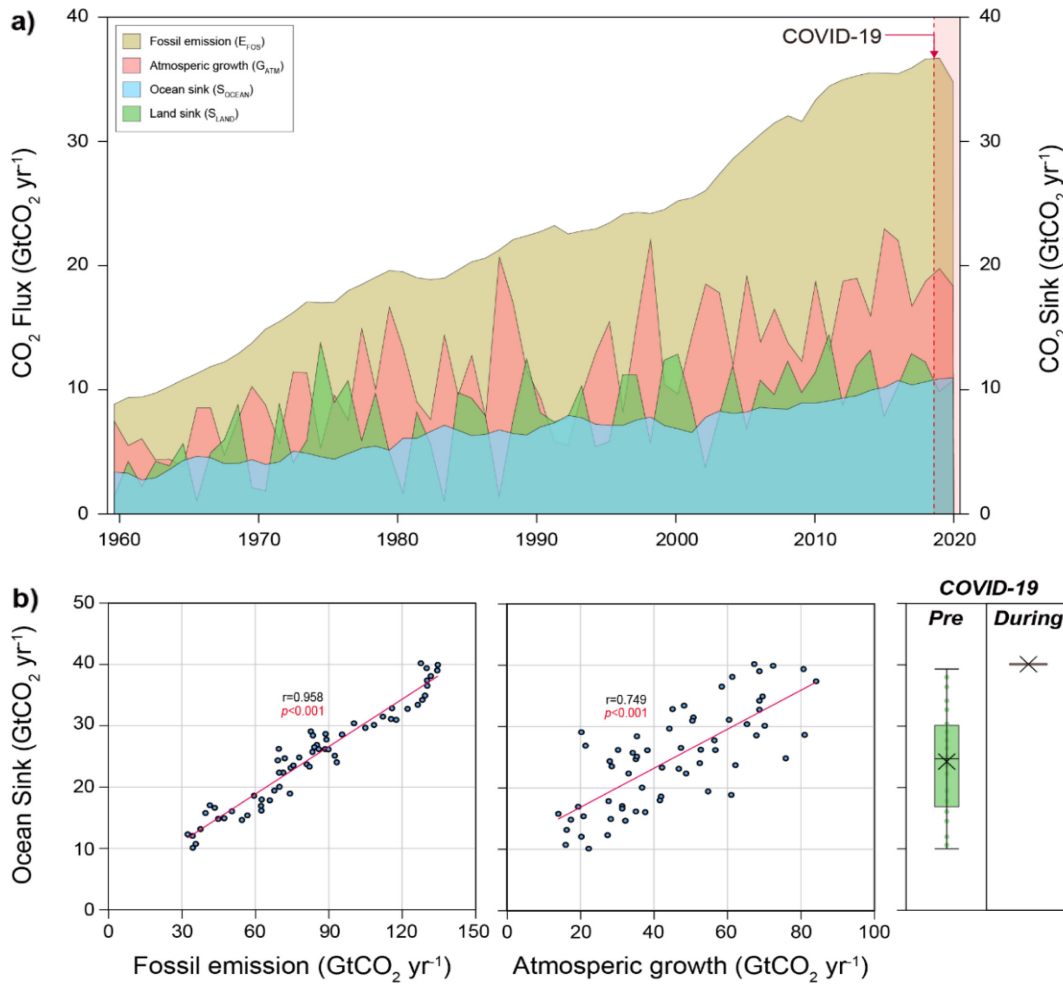
**Fig. 3.** Spatiotemporal distribution of CO<sub>2</sub> emission variations in industry and power plants globally. a) 12 locations including a global estimate of each sector change between 2020 and 2019 are shown in change (%), the variation of b) industrial and c) power stations CO<sub>2</sub> emission (Mt CO<sub>2</sub>) between 2020 and 2019. The colors indicate increase (red) and decrease (blue) changes between 2020 and 2019. Data was extracted between 2019 and 2020 to compare the effects of the COVID-19 pandemic periods (ICOS [2021]).

활동에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량이 증가한 것으로 나타났다. 특히 러시아는 최대 발전소 CO<sub>2</sub> 배출량 증가율(16.5%)을 보였으며, 월 최대 138.74 Mt CO<sub>2</sub>가 증가하는 것으로 나타났다. 중국의 발전소 CO<sub>2</sub> 배출량은 10.38 Mt CO<sub>2</sub>(0.23%)가량 증가하였으며, 산업활동에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량은 156.51 Mt CO<sub>2</sub>(3.82%)가 증가한 것으로 나타났다(Fig. 3b, 3c). 인도의 경우, CO<sub>2</sub> 배출량만 보면 산업활동의 CO<sub>2</sub> 배출량은 전년 대비 95.17 Mt CO<sub>2</sub>(7.71%)가 감소하였고, 전 발전소 CO<sub>2</sub> 배출량은 56.29 Mt CO<sub>2</sub>(3.70%) 감소하였으나 후반기에 다시 증가하는 것으로 나타났다. 중국, 인도와 러시아는 대표적인 CO<sub>2</sub>

배출국으로 COVID-19 팬데믹 후반기에 발전소와 산업활동이 정상화에 들어서면서 CO<sub>2</sub> 배출량이 증가한 것으로 사료된다(Jackson *et al.*[2022]). 한편, 유럽에서는 다양한 환경정책을 오랫동안 추진해 오고 있기 때문에 2020년도 후반기에도 여전히 발전소와 산업활동에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량이 줄어든 것으로 판단된다(Jones and Glachant[2010]).

### 3.4 COVID-19에 따른 전세계 CO<sub>2</sub> 배출량 변화

최근 1959-2020년 총 CO<sub>2</sub> 배출량( $E_{FOS} + E_{LUC}$ )의 81%는 화석



**Fig. 4.** a) Temporal variation of combined components of the global carbon budget, for fossil CO<sub>2</sub> emissions ( $E_{FOS}$ ). Fossil CO<sub>2</sub> emission is the emission from fossil fuel combustion and industrial processes excluding carbonation (Friedlingstein *et al.*[2021]), the atmospheric growth rate is estimated directly from atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations (Dlugokencky and Tans[2020]). b) The relative partitioning values of atmospheric growth ( $G_{ATM}$ ), ocean sink ( $S_{OCEAN}$ ), and land sink ( $S_{LAND}$ ), where the partitioning data is based on estimates from observations and the process model ensembles constrained data, respectively.

CO<sub>2</sub> 배출량(Fossil emission)으로 나타났다(Fig. 4a). 화학연료에서 부터 오는 CO<sub>2</sub> 배출량은 1960년부터 2020년까지 일정한 비율로 계속 증가하였으며, 2019년에 연간 36.70 Gt CO<sub>2</sub>로 최대 배출량을 보였다. 화석 CO<sub>2</sub> 배출량은 COVID-19 팬데믹 이후에 연간 34.81 Gt CO<sub>2</sub>로 급격히 감소(1.9 Gt CO<sub>2</sub>)하였다. 이는 1959년 이후로 최대 감소로 COVID-19에 대한 긍정적인 영향으로 사료된다(Friedlingstein *et al.*[2020]). 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도(Atmospheric growth)의 증가는 연간 편차가 크게 나타났음에도 불구하고 1959년(7.47 Gt CO<sub>2</sub>) 이후로 서서히 증가하고 있는 것으로 나타났다. 화학연료의 CO<sub>2</sub> 배출량과 동일하게 2019년(19.77 Gt CO<sub>2</sub>)에 비해 2020년(18.37 Gt CO<sub>2</sub>)에 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 4a).

해양흡수(Ocean sink)는 화학연료와 같이 1960년부터 꾸준히 CO<sub>2</sub> 흡수율이 증가하는 것으로 보였다(Fig. 4a). 실제로 해양흡수와 화석 CO<sub>2</sub> 배출량을 비교한 결과 유의한 양의 상관관계( $r=0.958, p < 0.01$ )가 나타났으며, 대기 중 CO<sub>2</sub>와도 유의한 양의 상관관계

( $r=0.749, p < 0.01$ )를 나타냈다. 이는 화석 CO<sub>2</sub> 배출량이 증가함에 따라 해양흡수 또한 높아지는 것으로 보인다. 실제로 해양환경의 대기오염 물질에 대한 흡수 능력은 높게 평가되고 있다(Chen and Lee[2022]; Macreadie *et al.*[2021]; Lee *et al.*[2021]; Kwon *et al.*[2022]). 해양흡수는 2020년에 CO<sub>2</sub> 흡수율이 10.97 Gt CO<sub>2</sub> 정도로 가장 높게 나타났으며, COVID-19 팬데믹 이후로도 육상흡수(Land sink) 보다 높은 흡수율(0.25 Gt CO<sub>2</sub>)을 보였다. 다만, 2019년 코로나 팬데믹 전후로 유의한 관계는 나타나지 않았다. 그러나 COVID-19 팬데믹 이후의 데이터가 미흡하기 때문에 COVID-19에 따른 영향을 더 정확하게 평가하기 위해서는 지속적인 모니터링이 필요하다(Espejo *et al.*[2020]). 또한 해양과 육지의 흡수율을 비교하였을 때, 해양의 보다 안정적인 CO<sub>2</sub> 흡수율은 지속적인 탄소 흡수원으로서 탄소중립이라는 목표에 다가가기 위해 중요한 부분이라고 평가된다(Macreadie *et al.*[2019]).



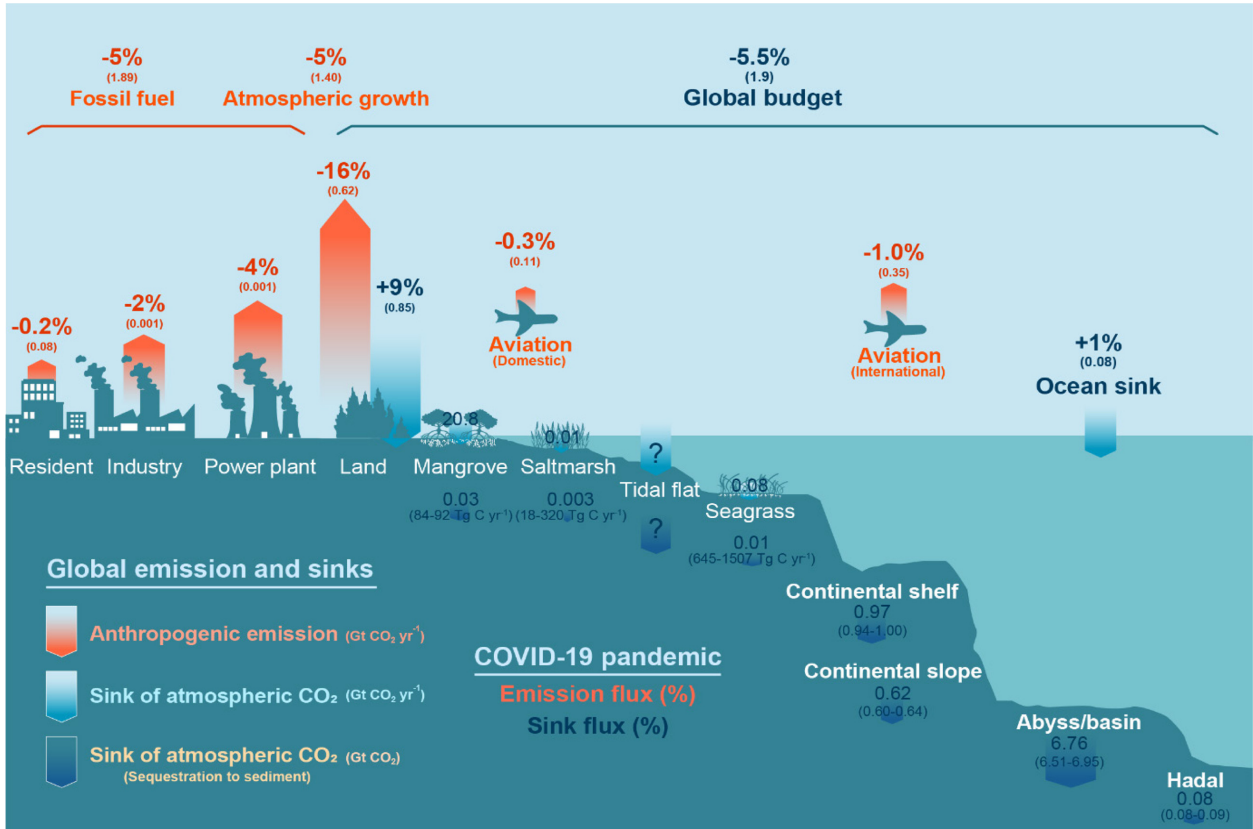


Fig. 5. A mini-review on the global emissions and sinks (ICOS[2021]; Friedlingstein *et al.*[2021]; Dlugokencky and Tans[2020]). Revisualization of the estimated carbon storage of each BCEs (mangrove, saltmarsh, seagrass) at a global scale and across oceanic provinces within 200-mile Exclusive Economic Zones (EEZs) (Atwood *et al.*[2020]).

### 3.5 COVID-19 팬데믹에 따른 전세계 CO<sub>2</sub> 배출량 및 블루 카본 잠재량 비교

해양환경에서 맹그로브 숲, 염습지, 잘피 숲을 포함한 BCEs의 잠재력은 2009년 이후 높은 탄소 흡수원으로 강조되었다. 블루카본 관련된 논문 중 BCEs를 평가하기 위해 전세계 규모에서 연구한 논문들을 중심으로 리뷰를 진행하였다. 그 결과, BCEs 중 가장 넓은 범위를 가진 생태계는 잘피 숲으로, 전세계적으로 약 155,676,220 ha를 차지하였다. 반면, 가장 작은 면적을 차지하는 BCEs는 염습지로, 전 세계 면적 중 5,644,575 ha를 차지했다. 그 외에 맹그로브 숲과 갯벌은 각 13,383,179 ha, 12,792,100 ha로 넓은 분포범위를 보였다(Fig. 5).

BCEs 분포범위 및 블루카본 잠재량은 대륙에 따라 차이가 크게 나타났다. 맹그로브 생태계의 경우 아시아에서 가장 넓은 분포면적(5,998,428 ha)을 보이며 맹그로브에서 약 1,809.9 Tg C, 퇴적물에서 3,017.9 Tg C의 탄소를 저장하는 것으로 나타났다. 잘피 숲의 경우 유럽에서 가장 넓게 분포(31,356,684 ha)하며, 약 5,822.6 Tg C의 탄소를 흡수하는 것으로 나타났다. 아메리카 대륙에서 주로 넓게 분포(2,441,096 ha)하는 염습지는 총 758.0 Tg C의 탄소를 저장하는 것으로 나타났으며, 이는 전세계 염습지의 총 탄소 잠재량의 절반 이상을 차지하는 것으로 나타났다(Table 1). BCEs 중 맹

그로브 숲(5,376 Tg)에서 가장 높은 탄소 잠재량이 나타났으며, 퇴적물 내 잠재량은 7,191 Tg로 나타났다. 반면, 염습지는 BCEs 중 가장 적은 양의 탄소를 저장하는 생태계로, 표층에서 약 1,405 Tg, 저층에서 약 861 Tg를 저장하는 것으로 확인되었다(Fig. 5; Table 1). 최근 블루카본 흡수원으로 주목받는 갯벌의 경우 관련 연구가 미흡하지만, 효과적인 탄소 저장능력(헥타르 당 1.4에서 514.2 Mg C)에 대한 연구가 된 바 있다(Chen and Lee[2022]). 국내에서 한국 갯벌을 대상으로 연구를 한 결과 염습지를 포함한 갯벌에서 총 12 Tg C의 탄소를 저장하며, 연당 총 66 Gg C yr<sup>-1</sup>의 탄소를 격리하는 것으로 밝혀졌다(Lee *et al.*[2021]). 이처럼 BCEs의 분포면적, 저장량, 그리고 격리율을 비교했을 때 갯벌이 효과적인 탄소흡수원으로서 국제적으로 인정받기 위해서는 탄소 흡수 프로세스 규명 및 정량적 연구가 필요하다.

BCEs 이외에 해저지형의 탄소 잠재량을 보았을 때, 해연/해저분지(1,844,000 Tg)에서 가장 많은 탄소를 저장하는 것으로 보이며, 대륙붕(266,000 Tg) 그리고 대륙사면(170,000 Tg) 순서로 나타났다. 또한 기타 해저지형(19,000 Tg)에서 가장 낮은 탄소 저장량을 보였다(Fig. 5). 단위면적당 가장 높은 저장량을 보인 해저지형은 대륙붕으로 18,666 Mg km<sup>2</sup>를 저장하는 것으로 나타났다. 심해대의 경우 동일한 면적당 6,014 Mg km<sup>2</sup>의 탄소를 저장하는 것으로

**Table 1.** Carbon stock (Tg C) and area (ha) of blue carbon ecosystems globally (1 Tg = 10<sup>9</sup> g)

Continent	Blue carbon ecosystem	Bound	Area (ha)		Carbon stock (Tg C)		Carbon stock range (Tg C)		References
			Total	Total	Minimum	Maximum			
Global	Mangrove	Biomass	Upper	15,014,237	3,930.9	0.7	1,039.0	b, e, f	
			Lower	13,595,412	1,754.3	0.0	574.3		
		Soil	Upper	13,383,179	7,191.1	0.0	1,781.0	a, c, e, h	
			Lower	8,179,733	2,577.8	0.0	831.2		
	Seagrass	Soil	Upper	155,676,220	21,010.2	0.0	2,322.7	c, f, g	
			Lower	27,847,796	3,740.7	0.0	374.0		
	Tidal marshes	Soil	Upper	5,644,575	1,405.0	0.0	640.0	d, g	
			Lower	-	860.5	0.0	353.6		
Asia	Mangrove	Biomass	Upper	5,998,428	1,809.9	0.7	1,039.0	b, e, f	
			Lower	5,375,166	916.0	0.0	574.3		
		Soil	Upper	5,516,575	3,017.9	0.0	1,781.0	a, c, e, h	
			Lower	3,838,213	1,268.4	0.0	831.2		
	Seagrass	Soil <sup>c</sup>	Upper	31,955,281	4,552.4	0.0	1,320.0	c, f, g	
			Lower	7,003,215	870.9	0.0	196.8		
	Tidal marshes	Soil	Upper	1,421,515	259.6	0.0	259.6	d, g	
			Lower	-	280.2	0.0	280.2		
Europe	Seagrass	Soil	Upper	31,356,684	5,822.6	0.1	994.9	c, f, g	
			Lower	2,766,155	445.7	0.0	86.8		
	Tidal marshes	Soil	Upper	424,503	156.6	0.0	58.4	d, g	
			Lower	-	61.0	0.0	12.2		
America	Mangrove	Biomass	Upper	4,824,156	1,128.6	0.8	312.9	b, e, f	
			Lower	3,787,114	297.1	0.0	97.8		
	Mangrove	Soil	Upper	4,494,193	2,477.2	0.0	514.6	a,c,e,h	
			Lower	2,737,689	877.3	0.0	235.8		
	Seagrass	Soil	Upper	38,740,832	5,418.9	0.0	1,704.4	c, f, g	
			Lower	7,934,478	1,430.5	0.0	374.0		
	Tidal marshes	Soil <sup>d,g</sup>	Upper	2,441,096	758.0	0.1	640.0	d, g	
			Lower	-	401.6	0.0	353.6		
Africa	Mangrove	Biomass <sup>b,e,f</sup>	Upper	3,003,540	686.5	1.5	211.8	b, e, f	
			Lower	2,819,694	293.2	0.0	66.8		
		Soil <sup>a,c,e,h</sup>	Upper	2,583,496	1,273.1	-	413.7	a, c, e, h	
			Lower	1,079,903	342.5	0.0	79.6		
	Seagrass	Soil <sup>c,f,g</sup>	Upper	20,728,177	1,879.4	0.0	274.3	c, f, g	
			Lower	7,391,036	490.8	0.1	177.4		
	Tidal marshes	Soil <sup>d,g</sup>	Upper	11957	3.1	1.5	3.1	d, g	
			Lower	-	1.2	0.6	1.2		
Oceania	Mangrove	Biomass <sup>b,e,f</sup>	Upper	1,188,113	305.9	2.0	140.3	b, e, f	
			Lower	1,613,438	247.9	0.0	113.9		
		Soil <sup>a,c,e,h</sup>	Upper	788,915	422.9	0.8	252.0	a, c, e, h	
			Lower	523,928	89.6	0.3	58.5		
	Seagrass	Soil <sup>c,f,g</sup>	Upper	32,895,246	3,336.9	0.0	2,322.7	c, f, g	
			Lower	2,752,912	502.8	0.9	225.7		
	Tidal marshes	Soil <sup>d,g</sup>	Upper	1,345,504	227.7	5.0	227.7	d, g	
			Lower	-	116.6	4.2	116.6		

(a) Giri *et al.*[2011]. (b) Hutchison *et al.*[2014]. (c) Atwood *et al.*[2017]. (d) Mcowen *et al.*[2017]. (e) Hamilton & Freiss [2018]. (f) Jayathilake *et al.*[2018]. (g) Macreadie *et al.*[2018]. (h) Sanderman *et al.*[2018].

나타났으며, 해저지형 중 가장 높은 탄소 저장효율은 대륙붕으로 나타났다(Atwood *et al.*[2020]).

종합적으로 COVID-19 팬데믹에 의해 인간의 활동이 제한되기

전과 후를 비교했을 때, 전세계 총 탄소 수치는 5.5%(1.9 Gt CO<sub>2</sub> yr<sup>-1</sup>)가 감소하였다. 코로나 확산으로 전세계 국가들이 항공 및 선박 운항을 제한하면서 사회적인 폐쇄 조치를 취했다. 실제로 국내와



국제 항공운행으로 인한 대기중 CO<sub>2</sub> 배출은 각각 0.3%와 1.0%로 줄었다. 또한 육상(16%), 발전소(4%), 산업활동(2%) 그리고 주택(0.2%)에서 사용되는 CO<sub>2</sub> 배출량이 감소하였다. 특히, 화석연료 사용으로 인해 대기중으로 배출되는 CO<sub>2</sub>량이 5%(1.89 Gt CO<sub>2</sub> yr<sup>-1</sup>)로 감소하였으며, 이에 따라 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도(5%, 1.40 Gt CO<sub>2</sub> yr<sup>-1</sup>) 또한 감소한 것으로 보인다. 앞서 언급한 것과 같이 COVID-19 팬데믹 이후에 증가하는 해양 흡수(1%)에는 BCEs와 해저지형의 탄소흡수원으로서 기여했을 것이다(Fig. 5). COVID-19 시기의 방역 조치(외출 제한, 사회적 거리 두기, 입출국 제한 등)로 인해 대기오염 및 해양 오염 뿐만 아니라 지구온난화를 일시적으로 중지하여 해양환경이 점차 회복할 수 있었다(Espejo *et al.*[2020]; Sarkodie and Owusu[2020]). 다만, COVID-19 팬데믹으로 생긴 사회적 제약에 따른 블루카본의 변화를 정확하게 판단하기에는 데이터가 부족한 실정이다. 특히 팬데믹 이후 변화된 사회적 활동과 해양환경 변화가 '2050 장기 저탄소 발전전략' 및 '2030 온실가스 감축 목표'와 같은 기후변화 대응 그리고 국제 사회 움직임에 어떤 영향을 미칠지에 대한 연구가 더욱 필요할 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

COVID-19 팬데믹으로 전세계 각국은 국경봉쇄, 이동제한 등과 같은 방역조치를 시행하면서 경제 생활에 영향을 미쳤다. 뿐만 아니라 인간의 활동과 연계된 해양환경에도 큰 영향을 미치고 있다. COVID-19 사태로 인한 불안심리는 주변 환경과 건강에 대한 관심이 급증하면서 기후변화의 심각성 인식 또한 확대되었다. 특히, 2050 탄소 중립 글로벌 의제화 등 국제사회의 기후변화 대응 움직임이 가속화됨에 따라 국내에서도 2050 탄소 중립선언('20.10)을 발표하였다. 그럼에도 불구하고 COVID-19 팬데믹에 따른 정확하고 정량적인 CO<sub>2</sub> 배출량과 탄소 잠재량에 대한 연구는 여전히 미흡하다.

본 연구에서는 COVID-19 팬데믹으로 생긴 사회적 제약에 따른 사회적 인식(대중 관심과 연구동향) 변화를 확인하고자 “블루카본” 키워드의 검색 빈도수와 COVID-19 팬데믹 전후에 대한 상호관계 분석을 수행하였다. 또한 전세계 각국의 방역대책으로 인한 산업활동의 감소가 전세계 CO<sub>2</sub> 배출량 및 흡수량에 미치는 영향을 비교하였다. 팬데믹 발생 이후 전세계 화석연료의 CO<sub>2</sub> 배출량과 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도가 감소하는 것으로 나타났으며, 모두 해양흡수율과 유의한 상관관계를 보였다. 해양흡수원인 BCEs 중 맹그로브 숲에서 가장 많은 탄소 잠재량을 확인하였으며, 대륙에 따라 분포 면적과 탄소 잠재량 차이를 보였다. 대부분 국가의 국경봉쇄, 이동제한 그리고 산업활동의 감소는 대기중 CO<sub>2</sub> 배출량을 감소시켰고, 해양으로의 흡수량은 증가한 것으로 보인다. COVID-19 팬데믹에 의해 인간의 활동이 제한되기 전후를 비교했을 때, 전세계 총 탄소 수치는 감소하였다. COVID-19에 의한 전세계적인 방역조치로 인해 산업활동이 제한되면서 대기중으로 발생하는 CO<sub>2</sub>는 감소하였으며 해양의 탄소 흡수량은 증가하는 긍정적인 효과를 보였다. COVID-19

가 장기화되면서 위드코로나(with Corona) 정책이 시작되었고 현실정에 맞는 블루카본 연구 방향성과 기초 데이터를 구축할 필요성을 시사한다.

#### 후 기

본 연구는 2023년도 해양수산부의 “블루카본 기반 기후변화 적응형 해안 조성 기술개발(KIMST-20220526)” 사업과 과학기술정보통신부의 “연안환경 내 육상기인오염물질의 생지화학적 특성 및 거동 메커니즘 규명을 통한 해양생태계 조절서비스의 정량적 가치 평가 연구(NRF-2022R1A2C1092682)” 과제의 지원을 받아 수행하였으며, 한국해양수산개발원이 후원한 해양수산 미래 리스크 공모전 수상작임을 밝힙니다.

#### References

- [1] Adam, M.G., Tran, P.T.M. and Balasubramanian, R., 2021, Air quality changes in cities during the COVID-19 lockdown: A critical review, *Atmos. Res.*, 264, 105823.
- [2] Andrijievic, M., Schlessner, C.F., Gidden, M.J., McCollum, D.L. and Rogelj, J., 2020, COVID-19 recovery funds dwarf clean energy investment needs, *Science*, 370, 6514.
- [3] Atwood, T.B., Conolly, R.M., Almahasheer, H., Carnell, P.E., Duarte, C.M., Lewis, C.J.E., Irigoien, X., Kelleway, J.J., Lavery, P.S., Macreadie, P.I., Serrano, O., Sanders, C.J., Santos, I., Steven, A.D.L. and Lovelock, C.E., 2017, Global patterns in mangrove soil carbon stocks and losses, *Nat. Clim. Change*, 7.
- [4] Atwood, T.B., Witt, A., Mayorga, J., Hammill, E. and Sala, E., 2020, Global patterns in marine sediment carbon stocks, *Front. Sci. Mars*, 7, 165.
- [5] Barouki, R., Kogevinas, M., Audouze, K., Belesova, K., Bergman, A., Birnbaum, L., Boekhold, S., Denys, S., Desseille, C., Drakvik, E., Frumkin, H., Garric, J., Destoumieux-Garzon, D., Haines, A., Huss, A., Jensen, G., Karakitsios, S., Klanova, J., Koskela, I.-M., Laden, F., Marano, F., Matthies-Wiesler, E.F., Morris, G., Nowacki, J., Paloniemi, R., Pearce, N., Peters, A., Rekola, A., Sarigiannis, D., Šebková, K., Slama, R., Staatsen, B., Tonne, C., Vermeulen, R. and Vineis, P., The HERA-COVID-19 working group, 2021, The COVID-19 pandemic and global environmental changes: Emerging research needs, *Environ. Int.* 146, 106272.
- [6] Bouillon, S., Borges, A.V., Castañeda-Moya, E., Diele, K., Dittmar, T., Duke, N.C., Kristensen, E., Lee, S.Y., Marchand, C., Middelburg, J.J. and Rivera-Monroy, V.H., 2008, Mangrove production and carbon sinks: a revision of global budget estimates, *Global Biogeochem. Cycles*, 22(2).
- [7] Chen, Z.L. and Lee, S.Y., 2022, Tidal Flats as a Significant Carbon Reservoir in Global Coastal Ecosystems, *Front. Mar. Sci.*, 9, 900896.

- [8] Chakraborty, I. and Maity, P., 2020, COVID-19 outbreak: Migration, effects on society, global environment and prevention, *Sci. Total Environ.* 728, 138882.
- [9] Chmura, G.L., Anisfeld, S.C., Cahoon, D.R. and Lynch, J.C., 2003, Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils, *Global Biogeochem. Cycles*, 17(4).
- [10] Clemente-Suárez, V.J., Navarro-Jiménez, E., Moreno-Luna, L., Saavedra-Serrano, M.C., Jimenez, M., Simón, J.A. and Tornero-Aguilera, J.F., 2021, The Impact of the COVID-19 Pandemic on Social, Health, and Economy, *Sustainability*, 13, 6314.
- [11] Collins, D.S., Avdis, A., Allison, P.A., Johnson, H.D., Hill, J., Piggott, M.D., Hassan, M.H.A. and Damit, A.R., 2017, Tidal dynamics and mangrove carbon sequestration during the Oligo-Miocene in the South China Sea. *Nat. Commun.*, 8(1), 1-12.
- [12] Davidson, N.C. and Finlayson, C.M., 2019, Updating global coastal wetland areas presented in Davidson and Finlayson (2018). *Mar. Freshw. Res.*, 70(8), 1195-1200.
- [13] Dlugokencky, E. and Tans, P., Trends in atmospheric carbon dioxide, National Oceanic & Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL), <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>, 2020. (Accessed on 27 September 2022).
- [14] Duarte, C.M., Losada, I.J., Hendriks, I.E., Mazarrasa, I., Marbà, N., 2013, The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation, *Nat. Clim. Change*, 3, 961-968.
- [15] Duarte, C.M., Marbà, N., Gacia, E., Fourqurean, J.W., Beggins, J., Barrón, C. and Apostolaki, E.T., 2010, Seagrass community metabolism: Assessing the carbon sink capacity of seagrass meadows. *Global Biogeochem. Cycles*, 24.
- [16] Espejo, W., Celis, J.E., Chiang, G. and Bahmonde, P., 2020, Environment and COVID-19: Pollutants, impacts, dissemination, management and recommendations for facing future epidemic threats. 747, 141314.
- [17] Feng, Z., Zheng, F., Liu, Y., Fan, X., Yan, C., Zhang, Y., Dalenbach, K.R., Bianchi, F., Petäjä, T., Kumala, M. and Bao, X., 2022, Evolution of organic carbon during COVID-19 lockdown period: possible contribution of nocturnal chemistry, *Sci. Total Environ.*, 808, 152191.
- [18] Freeman, C., Ostle, N.J., Fenner, N. and Kang, H., 2004, A regulatory role for phenol oxidase during decomposition in peatlands, *Soil Biol. Biochem.*, 36, 1663-1667.
- [19] Friedlingstein, P., Jones, M.W., O'Sullivan, M., Andrew, R.M., Dorothee, Bakker, D.C.E., Hauck, J., Le Quééré, C., Peters, G.P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Alin, S.R., Anthoni, P., Bates, A.P., N.R., Becker, M., Bellouin, N., Bopp, L., Chau, T.T.T., Chevallier, F., Chini, L.P., Cronin, M., Currie, K.I., Decharme, B., Djeutchouang, L.M., Dou, X., Evans, W., Feely, R.A., Feng, L., Gasser, T., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Grassi, G., Gregor, L., Gruber, N., Gürses, O., Harris, I., Houghton, R.A., Hurtt, G.C., Iida, Y., Ilyina, T., Luijckx, I.T., Jain, A., Jones, S.D., Kato, E., Kennedy, D., Goldewijk, K.K., Knauer, J., Korsbakken, J.I., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lauvset, S.K., Lefèvre, N., Lienert, S., Liu, J., Marland, G., McGuire, P.C., Melton, J.R., Munro, D.R., Nabel, J.E.M.S., Nakaoka, S., Niwa, Y., Ono, T., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Rosan, T.M., Schwinger, J., Schwingshackl, C., Séférian, R., Sutton, A.J., Sweeney, C., Tanhua, T., Tans, P.P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F., van der Werf, G., Vuichard, N., Wada, C., Wanninkhof, R., Watson, A.J., Willis, D., Wiltshire, A.J., Yuan, W., Yue, C., Yue, X., Zaehle, S., J.Z., Global Carbon Budget 2021, *Earth Syst. Sci. Data*, 2021.
- [20] Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M.W., Andrew, R.M., Hauk, J., Olsen, A., Peters, G.P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Quééré, C.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Alin, S., Aragão, L.E.O.C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N.R., Becker, M., Benoit-Cattin, A., Bittig, H.C., Bopp, L., Bultan, S., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L.P., Evans, W., Florentie, L., Forster, P.M., Gasser, T., Gelhén, M., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Gregor, L., Gruber, N., Harris, I., Hartung, K., Haverd, V., Houghton, R.A., Ilyina, T., Jain, A.K., Joetzjer, E., Kadono, K., Kato, E., Kitidis, V., Korsbakken, J.I., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozzi, D., Marland, G., Metzler, N., Munro, D.R., Nabel, J.E.M.S., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y., O'Brien, K., Ono, T., Palmer, P.I., Pierrot, D., Poulter, B., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Smith, A.J.P., Sutton, A.J., Tanhua, T., Tans, P.P., Tian, H., Tilbrook, B., van der Werf, G., Vuichard, N., Walker, A.P., Wanninkhof, R., Watson, A.J., Willis, D., Wiltshire, A.J., Yuan, W., Yue, W., Zaehle, S., 2020, Global carbon budget 2020, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 3269-3340.
- [21] Giri, C. *et al.*, 2011, Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 20, 154-159.
- [22] Graham, M., Eaves, M., Farmer, J., Dobson, J. and Fallick, A., 2001, A study of carbon and nitrogen stable isotope and elemental ratios as potential indicators of source and fate of organic matter in sediments of the Forth Estuary, Scotland. *Estuar. Coast Shelf Sci.*, 52, 375-380.
- [23] Hamilton, S.E. and Friess, D.A., 2018, Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012, *Nat. Clim. Chang.*, 8, 240-244.
- [24] Hutchison, J., Manica, A., Swetnam, R., Balmford, A., Spalding, M., 2014, Predicting Global Patterns in Mangrove Forest Biomass. *Conserv. Lett.* 7, 233-24.
- [25] IEA, Global Energy Review: CO<sub>2</sub> Emissions in 2020, IEA, Paris <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020>, 2021 (Accessed on 27 September 2022).
- [26] ICOS, Global Carbon Project. <https://doi.org/10.18160/gcp-2021>. 2021 (Accessed on September 2022).
- [27] Jackson, R.B., Friedlingstein, P., Quééré, C.L., Abernethy, S.,

- Andrew, R.M., Canadell, J.G., Ciais, P., Davis, S.J., Deng, Z., Liu, Z., Korsbakken, J.I. and Peters, G.P., 2022, Global fossil carbon emissions rebound near pre-COVID-19 levels, *Environ*, 17, 031001.
- [28] Jayathilake, D.R.M. and Costello, M.J., 2018, A modelled global distribution of the seagrass biome. *Biol. Conserv*, 226, 120-126.
- [29] Jiang, Q., Xu, Z., Ye, G., Pahlow, M., Hu, M. and Qu, S., 2022, A systematic scoping review of environmental and socio-economic effects of COVID-19 on the global ocean-human system, *Sci. Total Environ*, 849, 157925.
- [30] Kelleway, J.J., Saintilan, N., Macreadie, P.I. and Ralph, P.J., 2016, Sedimentary factors are key predictors of carbon storage in SE Australian saltmarshes. *Ecosystems*, 19(5), 865-880.
- [31] Kennedy, H., Beggins, J., Duarte, C.M., Fourqurean, J.W., Holmer, M., Marbà, N. and Middelburg, J.J., 2010, Seagrass sediments as a global carbon sink: Isotopic constraints, *Global Biogeochem. Cycles*, 24.
- [32] Kwon, I., Lee, C., Lee, J., Kim, B., Park, S.Y., Kim, J., Lee, J., Noh, J., Kwon, B., Son, S., Yoon, H.J., Nam, J., Choi, K. and Khim, J.S., 2022, The first national scale evaluation of total nitrogen stocks and burial rates of intertidal sediments along the entire coast of South Korea. *Sci. Total Environ*, 827, 154320.
- [33] Lee, J., Kim, B., Noh, J., Lee, C., Kwon, I., Kwon, B.O., Ryu, J., Park, J., Hong, S., Lee, S., Kim, S.-G., Son, S., Yoon, H.J., Yim, J., Nam, J., Choi, K. and Khim, J.S., 2021, The first national scale evaluation of organic carbon stocks and sequestration rates of coastal sediments along the West Sea, South Sea, and East Sea of South Korea. *Sci. Total Environ*, 793, 148568.
- [34] Lin, W.J., Wu, J. and Lin, H.J., 2020, Contribution of unvegetated tidal flats to coastal carbon flux. *Glob. Chang Biol*, 26(6), 3443-3454.
- [35] Liu, M., Hou, L., Xu, S., Ou, D., Yang, Y., Yu, J. and Wang, Q., 2006, Organic carbon and nitrogen stable isotopes in the intertidal sediments from the Yangtze Estuary, China. *Mar. Pollut. Bull*, 52, 1625-1633.
- [36] Macreadie, P., Anton, A., Raven, J.A., Beaumont, N., Connolly, R.M., Friess, D.A., Kelleway, J.J., Kennedy, H., Kuwae, T., Lavery, P.S., Lovelock, C.E., Smale, D.A., Apostolaki, E.T., Atwood, T.B., Baldock, J., Bianchi, T.S., Chmura, G.L., Eyre, B.D., Fourqurean, J.W., Hall-Spencer, J.M., Huxham, M., Hendriks, I.E., Krause-Jensen, D., Laffoley, D., Luisetti, T., Marbà, N., Masque, P., McGlathery, K.J., Megonigal, J.P., Murdiyarso, D., Russell, B.D., Santos, R., Serrano, O., Silliman, B.R., Watanabe, K. and Durate, C.M., 2019, The future of Blue Carbon science, *Nature communication*, 10, 3998.
- [37] Macreadie, P., Costa, M.D.P., Atwood, T.B., Friess, D.A., Kelleway, J.J., Kennedy, H., Lovelock, C.E., Serrano, O. and Duarte, C.M., 2021, Blue carbon as a natural climate solution, *Nature*, 2.
- [38] Macreadie, P.I., Costa, M.D., Atwood, T.B., Friess, D.A., Kelleway, J.J., Kennedy, H. and Duarte, C.M., 2021, Blue carbon as a natural climate solution. *Nat. Rev. Earth Environ*, 2(12), 826-839.
- [39] Ma J.-G., Zhu, B., Jiang, L. and Xi, X.M., 2022, Gender- and age-based differences in outcomes of mechanically ventilated ICU patients: a Chinese multicentre retrospective study, *BMC. Anesthesiology*, 22, 18.
- [40] Mahato, S., Pal, S. and Ghosh, K.G., 2020, Effects of lockdown amid COVID-19 pandemic on air quality of the megacity Delhi, India. *Sci. Total Environ*. 730, 139086.
- [41] Mcowen, C.J. et al., 2017, A global map of saltmarshes, *Bio-divers. Data J*, 5.
- [42] McHarg, E., Mengo, E., Benson, L., Daniel, J., Joseph-Witzig, A., Posen, P. and Luisetti, T., 2022, *Environ. Sci. Policy*, 132, 13-23.
- [43] Mcleod, E., Chmura, G.L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C.M., Lovelock, C.E., Schlesinger, W.H. and Silliman, B. R., 2009, A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO<sub>2</sub>. *Front. Ecol. Environ*, 9(10), 552-560.
- [44] Murray, N.J., Phinn, S.R., DeWitt, M., Ferrari, R., Johnston, R., Lyons, M.B. and Fuller, R.A., 2019, The global distribution and trajectory of tidal flats. *Nature*, 565(7738), 222-225.
- [45] Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C.M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L. and Grimsditch, G., 2009, Blue Carbon. A Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme.
- [46] Pendleton, L., Donato, D.C., Murray, B.C., Crooks, S., Jenkins, W.A., Sifleet, S. and Baldera, A., 2012, Estimating global "blue carbon" emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *PloS one*, 7(9), e43542.
- [47] Peng, Y., Wu, P., Schartup, A.T. and Zhang, Y., 2021, Plastic waste release caused by COVID-19 and its fate in the global ocean, *PNAS*, 118, 47.
- [48] Rubaltelli, E., Tedaldi, E., Orabona, N. and Scrimin, S., 2020, Environmental and psychological variables influencing reactions to the COVID-19 outbreak. *Br. J. Health Psychol*, 25, 1020-1038.
- [49] Sarkodie, S.A. and Owusu, P.A., 2020, Global assessment, health and economic impact of the novel coronavirus (COVID-19). *Environ. Dev. Sustain*. 23, 5005-5015.
- [50] Sanderman, J. et al., 2018, A global map of mangrove forest soil carbon at 30 m spatial resolution, *Environ. Res. Lett*. 13, 55002.
- [51] Serrano, O., Lavery, P., Duarte, C., Kendrick, G.A., Calfat, A. M., York, P.H., Steven, A.D. and Macreadie, P.I., 2016, Can mud (silt and clay) concentration be used to predict soil organic carbon content within seagrass ecosystems? *Biogeosciences*, 13, 4915-4926.
- [52] Singh, J. and Singh, J., 2020, COVID-19 and Its Impact on Society. *Electron. Res. J. soc. sci. humanities*, 2, 1.
- [53] Spivak, A.C., Sanderman, J., Bowen, J.L., Canuel, E.A. and Hopkinson, C.S., 2019, Global-change controls on soil-carbon accumulation and loss in coastal vegetated ecosystems. *Nat. Geosci*, 12(9), 685-692.

- [54] Tamis, J.E. and Foekema, E.M., 2015, A review of blue carbon in the Netherlands, IMARES, C151/15.
- [55] Tobías, A., Camerero, C., Reche, C., Massagué, J., Via, M., Minguillón, M.C., Alastuey, A. and Querol, X., 2020, Changes in air quality during the lockdown in Barcelona (Spain) one month into the SAR-CoV-2 epidemic. *Sci. Total Environ.* 726, 138540.
- [56] Verma, A.K. and Prakash, S.J., 2020, Impact of COVID-19 on environment and society, *J. Glo. Biosci.* 9, 5.
- [57] Walton, M.E.M., Samonte-Tan, G.P.B., Primavera, J.H., Edward-Jones, G. and Vay, L.L., 2006, Are mangroves worth replanting? The direct economic benefits of a community-based reforestation project, *Environ. Conserv.* 33, 335-343.
- [58] WHO, WHO Director-General's opening remarks at the media briefing on COVID-19 - 11 March 2020, <https://www.who.int/director-general/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19--11-march-2020>, 2020 (Accessed on September 2022).
- [59] Windham-Myers, L., Crooks, S. and Troxler, T.G., 2018, A blue carbon primer: the state of coastal wetland carbon science, practice and policy. CRC Press.
- [60] Xiang, J., Liu, D., Ding, W., Yuan, J. and Lin, Y., 2015, Invasion chronosequence of *Spartina alterniflora* on methane emission and organic carbon sequestration in a coastal salt marsh. *Atmos. Environ.* 112, 72-80.
- [61] Xiaonan, D., Xiaoke, W., Lu, F. and Zhiyun, O., 2008, Primary evaluation of carbon sequestration potential of wetlands in China. *Sheng Tai Xue Bao*, 28, 463-469.
- [62] Yang, J., Gao, J., Liu, B. and Zhang, W., 2014, Sediment deposits and organic carbon sequestration along mangrove coasts of the Leizhou Peninsula, southern China. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 136, 3-10.

---

Received 17 October 2022

Revised 28 November 2022

Accepted 6 February 2023