

만경강 하구습지의 탄소 저장량 및 플럭스와 토양의 물리화학적 특성과의 관계

정헌모 · 한상학 · 이응필 · 장인영**

국립생태원

The carbon storage and fluxes in the Mankyong River Estuary and their relationships with soil physico-chemical properties

HeonMo Jeong · SangHak Han · EungPill Lee · Inyoung Jang**

National Institute of Ecology, Seocheon, Korea

(Received : 30 October 2025, Revised : 17 November 2025, Accepted : 17 November 2025)

요약

전자구적 탄소 순환에 있어, 자연생태계는 유일한 탄소 흡수원으로서의 역할을 담당하고 있다. 최근 심화되는 기후변화에 따라, 자연생태계의 탄소 흡수원으로서의 기능에 대한 중요성이 강조되고 있다. 특히, 습지 생태계의 경우 높은 생산성을 가진 반면에 낮은 분해율을 가진 생태계로 타 생태계에 비해 단위면적당 많은 양의 탄소를 저장하고 있다고 알려져 있다. 본 연구에서는 국내 하구습지의 탄소 저장량 및 토양 호흡량 분석을 위해 전라북도 김제시에 위치한 만경강 하구습지(35° 51'54"N, 126° 43'38"E)에서 초본 식생을 확인하고 식물체 탄소 저장량을 측정하였다. 그리고 토양의 계절적 탄소 저장량과 토양호흡량을 함께 측정하였다. 그 결과 만경강 하구습지에는 통통마디군락(*Salicornia europaea* community)과 칠면초군락(*Suaeda japonica* community), 그리고 갈대군락(*Phragmites communis* community)이 우점하고 있었으며 식물체 탄소 저장량은 갈대군락에서 $6.5 \pm 2.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 로 가장 많았다. 토양의 계절적 탄소저장량은 $4.3 \pm 0.62 \sim 10.6 \pm 1.90 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 의 범위를 나타냈으며 가을철에 가장 많았다. 토양호흡량은 $0.10 \pm 0.06 \sim 0.59 \pm 0.19 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 의 범위를 나타냈으며 여름철에 가장 많았다. 토양의 물리화학적 특성 중 수분함량, 총질소(T-N), 총인(T-P) 그리고 pH는 탄소저장량과 유의한 양의 상관관계를 보여 탄소저장량은 유기물의 축적과 분해에 영향을 받는 것으로 판단되었다. 토양호흡량은 온도와 C/N 비와 각각 양의 상관관계와 음의 상관관계를 보여, 토양호흡량은 미생물의 활성과 직접적인 관련이 있음을 보여줬다. 결과적으로 하구습지의 토양 탄소저장량과 토양호흡량은 토양의 물리화학적 특성과 토양온도에 의해 유기적인 조절작용이 발생하는 것으로 판단된다. 본 연구는 하구습지의 탄소저장능력과 환경요인간의 특성을 분석하고, 온실가스 산정 및 모델 활용을 위한 과학적 기초자료를 제시하고자 수행되었다.

핵심용어 : 식생 탄소저장량, 토양 탄소저장량, 토양 호흡, 환경 요인

Abstract

The natural ecosystem plays a unique role as the only carbon sink in the global carbon cycle. With the intensifying impacts of climate change, the importance of this function has been increasingly emphasized. In particular, wetland ecosystems are known to have high productivity but low decomposition rates, allowing them to store large amounts of carbon per unit area compared to other ecosystems. In this study, soil samples were seasonally collected from the Mankyong River Estuarine wetland (35° 51'54"N, 126° 43'38"E) located in Gimje, Jeollabuk-do, to analyze soil characteristics, carbon storage, and soil respiration. The carbon storage of vegetation within the wetland was also measured. As a result, three dominant plant communities were identified in the Mankyong River Estuarine wetland: *Salicornia europaea*, *Suaeda japonica*, and *Phragmites communis* communities, with the *Phragmites communis* community showing the highest plant carbon storage as $6.5 \pm 2.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$. The seasonal variation in soil carbon storage ranged from 4.3 ± 0.62 to $10.6 \pm 1.90 \text{ Mg C ha}^{-1}$, with the highest values observed in Fall. Soil respiration ranged from 0.10 ± 0.06 to $0.59 \pm 0.19 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$, showing the highest rates in Summer. Seasonal variations

*To whom correspondence should be addressed.

National Institute of Ecology, Seocheon, Korea

E-mail : inyoung@nie.re.kr

- Inyoung Jang Senior Researcher (ijjang@nie.re.kr)
- HeonMo Jeong National Institute of Ecology/Researcher(eimple01@nie.re.kr)
- Snaghak Han National Institute of Ecology/Researcher(ijjang@nie.re.kr)
- EungPill Lee National Institute of Ecology/Associate Researcher(ecoman21@nie.re.kr)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

showed that soil carbon storage was highest in autumn, while soil respiration was greatest in summer. Among the soil physico-chemical properties, moisture content, total nitrogen (T-N), total phosphorus (T-P), and pH exhibited significant positive correlations with carbon storage, indicating that carbon accumulation is influenced by the balance between organic matter accumulation and decomposition. Soil respiration showed a positive correlation with temperature and a negative correlation with the C/N ratio, suggesting a close relationship between soil respiration and microbial activity. Overall, the results indicate that soil carbon storage and soil respiration in estuarine wetlands are organically regulated by soil physico-chemical properties and temperature. This study was conducted to analyze the relationship between carbon storage capacity and environmental factors in estuarine wetlands and to provide scientific baseline data for greenhouse gas estimation and model development.

Key words : Vegetation carbon storage, Soil carbon storage, Soil respiration, Environmental factors

1. 서론

기후변화는 전 세계적으로 심각한 환경 문제로 대두되고 있으며, 대기 중 온실가스 농도 증가로 인한 지구온난화가 지속되고 있다 (Macreadie *et al.* 2019). 이러한 상황에서 생태계의 탄소저장 능력을 정확히 이해하고 평가하는 것은 기후변화 대응을 위해 매우 중요하다 (Campbell *et al.* 2022; Adame *et al.* 2024). 특히 하구습지는 뛰어난 탄소 흡수 및 저장 능력으로 인해 기후변화 완화에 핵심적인 역할을 하는 생태계로 인식되고 있으며, 블루카본(blue carbon) 생태계로 분류되어 전 세계적으로 보호와 복원의 중요성이 강조되고 있다 (Kuwaie, 2015; Friess *et al.* 2024).

하구습지는 담수와 해수가 만나는 독특한 생태계로서 염생식물의 높은 일차생산성과 퇴적물의 탄소 축적 특성으로 인해 탄소순환에 특별한 의미를 갖는다 (Wang *et al.* 2017; Yuan *et al.* 2022). 염생식물은 대기 중 이산화탄소를 흡수하여 주변 퇴적층에 탄소를 저장하는 기능을 수행하며(Sousa *et al.* 2010), 이를 통해 형성되는 블루카본은 대기 중 CO₂를 저감하는 중요한 관리 정책으로 평가받고 있다 (Douglas *et al.* 2022; Suwandhahannadi *et al.* 2024). 실제로 하구 습지는 육상 생태계에 비해 단위면적당 4배 이상 높은 탄소저장량을 보이는 것으로 확인되고 있으며 (Byun *et al.* 2019), 전 세계 온대 하구에서 58.78 ± 19.30 Mg C ha⁻¹의 높은 탄소저장량이 보고되고 있다 (Douglas *et al.* 2022). 토양호흡은 토양에 저장된 탄소가 미생물의 활동으로 인해 대기로 방출되는 작용으로 전지구적 탄소순환의 핵심적인 과정이다 (Song *et al.* 2021; Jia *et al.* 2024). 토양호흡은 식물 뿌리의 자가영양호흡과 토양 미생물의 종속영양호흡을 포함하며, 토양 온도, 수분, pH, 염분농도 등 다양한 환경 요인의 영향을 받는다 (Jeong *et al.* 2017; Lee *et al.* 2024). 특히 연안습지에서는 조석의 영향으로 토양 수분 상태가 급격히 변화하며, 이는 토양의 산화환원 조건과 미생물 활성에 직접적인 영향을 미쳐 토양호흡량을 조절하는 중요한 요인으로 작용한다 (Han *et al.* 2018).

우리나라 하구습지의 탄소저장량에 대한 연구 결과에 따르면, 전체 갯벌의 잠재적 CO₂ 저장량은 190.8 Tg CO₂로 추정되며, 이는 한국 전체 온실가스 배출량의 27.7%에 해당하는 막대한 양이다 (Byun *et al.* 2019). 그러나 하구습지의 탄소

저장량과 토양호흡량의 특성은 어떠한지, 그리고 어떤 환경 요인에 따라 조절되는지에 대한 체계적인 연구는 전무한 실정이다. 만경강 하구는 우리나라 서해안의 대표적인 하구 습지로 이 지역은 조석의 영향을 받는 기수역이며 염분농도, 토양 입도, 영양염 등 다양한 물리화학적 환경 조건이 공존하고 이러한 환경 변화가 식생의 분포와 생산성, 그리고 탄소순환 과정에 복합적인 영향을 미칠 것으로 예상된다 (Watson *et al.* 2022). 따라서 본 연구는 만경강 하구습지를 대상으로 초본 식생과 토양의 탄소저장량, 그리고 토양호흡을 통한 탄소플럭스를 분석하고자 한다. 또한 염도, pH, 토양 수분함량, 총질소(T-N), 총인(T-P) 등 물리화학적 요인들이 탄소저장량과 토양호흡에 미치는 영향을 평가하여, 하구습지 생태계의 탄소순환 특성을 분석하고자 한다. 이를 통해 국내에서 부족한 하구습지의 탄소순환 연구에 기초자료를 제공하고, 습지 관리 방안 수립 및 장기 모니터링을 위한 과학적 자료를 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구지역 정보

연구의 대상지역은 전라북도 김제시 진봉면 고사리에 위치한 하구 습지이며 2024년 봄, 여름 그리고 가을에 걸쳐 수행되었다(35° 51'54"N, 126° 43'38"E, Figure 1). 금강 하구와 서해가 만나는 이 습지의 전체 면적은 44.18km²이며, 1997년 이후 28년 동안 조사지가 위치한 김제시의 연평균 기온은 13.4°C(Figure 2), 연강수량은 1,172.5mm(Figure 3)로 분석되었다(www.data.kma.go.kr). 선행연구에 따르면 연구가 수행된 하구습지에는 갈대(*Phragmites communis*), 통통마디(*Salicornia europaea*), 칠면초(*Suaeda japonica*), 해홍나물(*Suaeda maritima*) 그리고 모새달(*Phacelurus lalifolius*) 등이 서식하는 것으로 조사되었다.

2.2 식생 탄소저장량 산정을 위한 샘플 채취

연구 대상 지역의 식생 탄소저장량을 산정하기 위하여 계절별(봄, 여름 그리고 가을)로 현장 조사를 진행하였다. 먼저 습지 내 우점 초본 식생을 확인하였고 초본 식생의 탄소저장량을 측정하기 위해 여름에 초본 식생 별로 1.0×1.0m²의 방형구를 각각 3개씩 설치하여 수확하였다. 수확된 식생의 지상부는 실험실로 옮겨 80°C 건조 오븐에 3일간 방치한 후

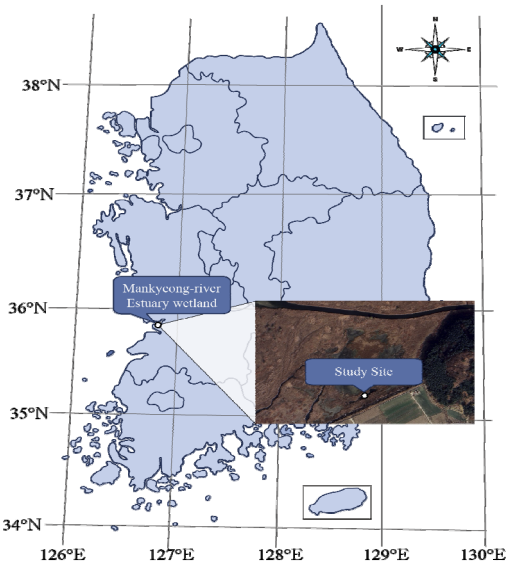


Fig. 1. A map showing the location of study site in the Mankyong-river Estuary Wetland

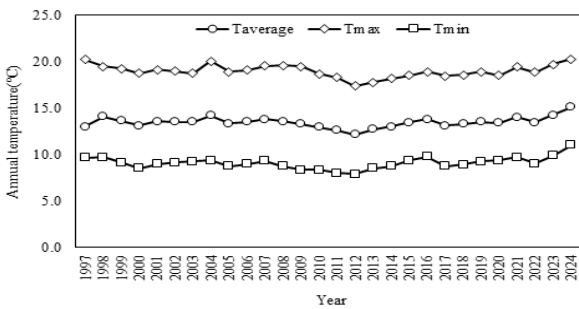


Fig. 2. Atmospheric temperature in the experimental region over the past 28 years. Taverage : average temperature, Tmax : maximum temperature, Tmin : minimum temperature

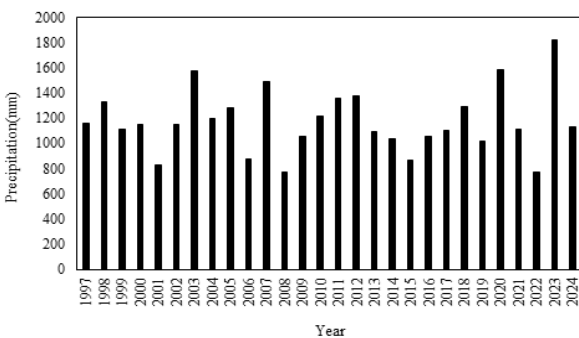


Fig. 3. Precipitation in the experimental region over the past 28 years.

건중량을 측정하였다. 이후 초본식물의 탄소저장량은 식물 건중량에 0.47을 곱하여 식물의 탄소저장량을 추정하였다 (IPCC 2006).

2.3 토양 샘플링 및 물리화학적 특성 분석

하구 습지 토양의 물리화학적 특성을 분석하기 위하여 계절별(봄, 여름 그리고 가을)로 습지 내 3개 지점의 깊이 약

10cm에서 토양을 각각 3회 채취하였다. 그리고 추가적으로 토양의 용적밀도(bulk density) 측정을 위하여 봄철조사에서 100ml 토양 시료 코어를 활용하여 3개 지점에서 1회 채취하였다. 이때 토양의 용적밀도는 계절, 기후 등에 따라 수시로 변화하는 물리량이 아니므로 연구기간 최초 1회에만 측정하였다. 토양의 물리화학적 특성은 토성(soil texture), 토양 수분 함량, 용적밀도(bulk density), 총유기탄소(Total Organic Carbon), 산성도(pH), 염도(salinity), 총인(T-P), 총질소(T-N), C:N비를 분석하였다. 토양의 물리화학적 분석은 서울대학교 농생명과학공동기기원(NICEM; KOLAS 공인시험인증기관)에 의뢰하여 수행하였다.

2.4 토양 호흡량 측정

하구 습지의 토양 호흡량을 평가하기 위하여 계절별로 습지 내 토양호흡량을 측정하였다. 토양호흡량 측정은 휴대용 적외선 CO₂ 가스 분석기(EGM-5, PP System, USA)를 활용하였으며 각 계절별로 오전 10시에서 오후 3시 사이에서 15회 이상 측정하였다. 토양호흡 측정은 물에 잠기지 않고 대기 중으로 드러난 곳에서 수행되었으며 토양호흡 측정시 약 10cm 깊이에서 토양온도를 함께 측정하였다. 토양 호흡 측정을 통해 얻어진 데이터는 토양 온도와 토양 호흡량 간의 상관분석을 위해 사용되었다.

2.5 통계 분석

본 연구에서 초본식생 간 현존량과 계절별 탄소 저장량 및 토양 호흡량 그리고 계절별 토양 물리화학적 분석 결과 비교를 위하여 one-way ANOVA를 실시하였다. 그리고 사후검정 (post-hoc)은 Tukey's HSD(Honesty Significant Difference)를 실시하였다. 토양 호흡량과 토양 온도에 대한 분석과 탄소 저장량 및 플럭스와 토양의 물리화학적 특성에 대한 분석은 Pearson의 상관분석을 실시하였다. 모든 통계 분석은 R program(ver. 4.4.2, www.r-project.org)을 활용하였으며 5% 유의 수준에서 실시되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 식생과 토양의 탄소 저장량

습지 내 식생의 탄소 저장량을 평가하기 위하여 초본식생의 지상부를 수확하고 탄소량을 측정하였다. 조사 대상 지역 내 식생은 갈대군락(*P. communis* community), 통통마디군락(*S. europaea* community), 칠면초군락(*S. japonica* community)이 분포하고 있었으며 각 초본 식생의 지상부 현존량은 각각 1.4 ± 0.45 , 0.9 ± 0.35 그리고 $0.5 \pm 0.19 \text{ kg m}^{-2}$ 인 것으로 산정되었다. 이를 탄소 저장량으로 환산했을 때, 갈대군락, 통통마디군락 그리고 칠면초군락은 각각 6.5 ± 2.1 , 4.1 ± 1.7 그리고 $2.2 \pm 0.9 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 의 탄소가 저장되어 있는 것으로 추정되었다. 초본군락 별로 단위 면적당 지상부 탄소 저장량이 가장 많은 곳은 갈대군락이었으며 칠면초군락이 가장 적었고

통통마디 군락은 중간이었다($p < 0.000$, Figure 4). 습지 내 토양의 탄소 저장량을 평가하기 위하여 계절별 탄소량을 분석하였다. 그 결과 봄, 여름 그리고 가을철의 토양 탄소 저장량은 각각 4.3 ± 0.62 , 5.2 ± 1.07 그리고 $10.6 \pm 1.90 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 이었다. 습지 내 토양 탄소량은 가을철에 많았고 봄과 여름은 차이가 없었다($p < 0.003$, Figure 5).

2004~2013년에 수행된 국가장기생태연구에 따르면 2010년 함평만 습지의 갈대군락에는 약 4.2 Mg C ha^{-1} , 통통마디군락에는 $0.62 \text{ Mg C ha}^{-1}$, 칠면초군락에는 $0.64 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 의 탄소가 저장되어 있었다. 본 연구 대상지인 만경강 하구습지에서는 갈대군락이 $6.5 \pm 2.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 로 함평만 습지와 비교하여 더 많은 탄소를 저장하고 있었고 통통마디 ($4.1 \pm 1.7 \text{ Mg C ha}^{-1}$), 칠면초($2.2 \pm 0.9 \text{ Mg C ha}^{-1}$)군락 역시 함평만 습지보다 만경강하구습지에서 더 많은 탄소를 저장하고 있었다. 또한 만경강 하구습지와 함평만 습지 모두 갈대군락에서 가장 많은 탄소를 저장하고 있는 것은 동일했다.

본 연구에서 확인된 칠면초군락의 지상부는 약 2.2 Mg C ha^{-1} 의 탄소가 저장되어 있었는데 강화도 남부 조간대에서 식하는 칠면초군락에서 약 1.4 Mg C ha^{-1} , 인천 영종도에서 식하는 칠면초군락에서 약 $0.53 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 의 탄소가 저장되어 있는 것으로 보고되어 만경강 하구의 칠면초군락의 탄소 저장량이 더 많았다(Hwang *et al.* 2022; Hwang *et al.* 2025).

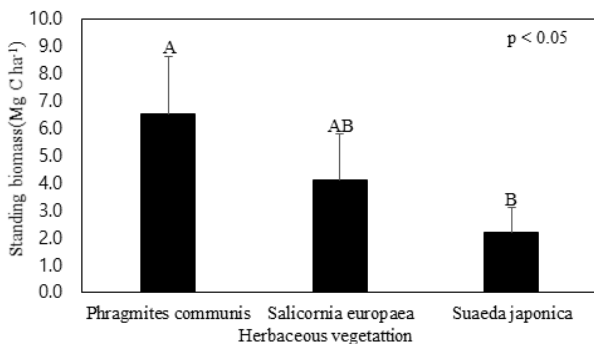


Fig. 4. Standing biomass (Mg C ha^{-1}) in the herbaceous vegetations. Alphabets on the bars mean significantly different among the vegetations.

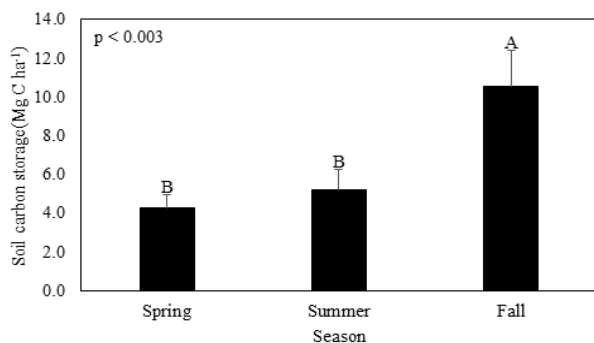


Fig. 5. Soil carbon storage (Mg C ha^{-1}) in the wetland. Alphabets on the bars mean significantly different among the seasons.

2010년 함평만에 분포하는 갯잔디, 해홍나물 그리고 질경이는 각각 1.2, 0.4 그리고 $2.39 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 의 탄소를 저장하고 있었고(<https://www.nie-ecobank.kr/>) 낙동강 하구 갯벌에 생육하는 세모고랭이(*Schoenoplectus triqueter*)의 지상부에는 $0.87 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 의 탄소를 저장하고 있어(Jeong *et al.* 2006) 만경강 갈대군락을 제외하고 전반적인 하구습지 초본식생의 탄소저장량은 큰 차이를 나타내지 않았다.

본 연구에서 하구습지의 토양 탄소저장량은 3계절 중 가을에 축적량이 많았는데 이는 계절 중 가을철의 TOC(Total Organic Carbon) 축적이 높고 식생 지하부의 탄소 변화 증가가 가을에 커지기 때문인 것으로 분석된다(Hwang *et al.* 2025).

3.2 토양 호흡량 평가

계절 별(봄, 여름 그리고 가을) 토양 온도는 각각 $29.7 \pm 0.15^\circ\text{C}$, $40.3 \pm 0.54^\circ\text{C}$ 그리고 $23.6 \pm 1.92^\circ\text{C}$ 였고, 토양 호흡량은 각각 0.29 ± 0.19 , 0.59 ± 0.19 그리고 $0.10 \pm 0.06 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 이었다. 평균적으로 토양 온도는 여름에 가장 높고 가을에 가장 낮았다. 토양 호흡량은 여름에 가장 많았고 봄과 가을철은 통계적인 차이가 없었다($p < 0.0000$, Figure 6). 조사 기간 동안 토양 온도는 $21.8 \sim 40.9^\circ\text{C}$ 를 나타냈으며 측정된 토양 호흡량과 토양 온도 간의 상관분석을 실시한 결과 상관계수(R) 0.7282로 강한 양의 상관관계를 나타냈다($p < 0.0000$, Figure 7).

중국 황하강 연안습지의 연평균 토양호흡량은 $0.135 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 인(최대 $0.193 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$) 것으로 조사되었는데

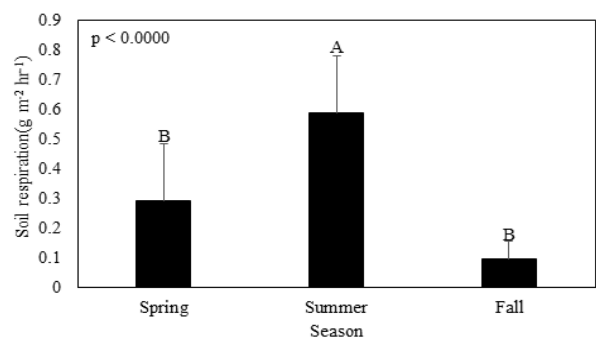


Fig. 6. Soil respiration in the wetland. Alphabets on the bars mean significantly different among the seasons.

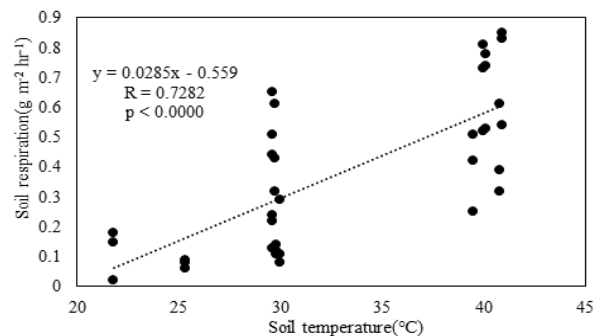


Fig. 7. Relationship between soil respiration and the temperature at 10cm depth below ground in the wetland.

토양온도가 토양호흡에 영향을 미치는 주요 요인으로 확인 되었으며 계절 변동의 약 85%를 차지한 것으로 나타났다(Chen *et al.* 2016). 중국 양쯔강에서도 역시 본연구와 마찬가지로 여름에 단일 피크(mono-peak)가 나타나며 토양 온도와 상당한 상관관계가 확인되었다(Nie *et al.* 2011). 본 연구의 만경강 하구에서 측정된 토양 호흡량은 중국의 연구사례와 같이 여름철에 가장 많았고(Figure 6) 토양온도와의 상관 관계가 강한 것으로 나타났다.

3.3 토양의 물리화학적 특성

습지 토양의 물리화학적 특성 분석 결과 토성은 모래(sand), 실트(silt) 그리고 점토(clay)의 비율이 각각 68.8 ± 2.38 , 17.9 ± 1.84 그리고 $13.3 \pm 1.07\%$ 인 것으로 나타났고 용적밀도는 $1.42 \pm 0.08 \text{ g cm}^{-3}$ 으로 분석되었다. 습지 토양의 pH는 8.4~8.8으로 알칼리성을 나타냈고 계절별 차이는 없었다(Figure 8(A)). 토양의 염도(Salinity)는 2.40~5.86‰으로 여름에 가장 높았고 봄과 가을에 낮았다($p < 0.0008$, Figure 8(B)). 토양의 총인(T-P)은 $238.8 \sim 654.4 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 가을에 가장 높았고 봄에 낮았으며 여름은 중간이었다($p < 0.0004$, Figure 8(C)). 토양의 수분함량은 27.1~41.3%로 가을에 가장 많고 봄에 낮았으며

여름은 중간이었다($p < 0.0000$, Figure 8(D)). 토양의 총질소(T-N)는 $250 \sim 900 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 가을에 높았고 봄과 여름에는 차이가 없었다($p < 0.002$, Figure 8(E)). C:N비는 6.5~11.7로 평균적으로 봄에 가장 높고 여름에 가장 낮았으나 통계적으로 차이가 없었다.

중국 요하에 위치한 하구습지의 pH는 8.0 이상의 알칼리성(8.31~8.49)을 띠며 특히 Genus *Suaeda*(칠면조속), 갈대 식물 등이 분포하는 습지에서 가장 높은 알칼리성을 나타내 본 연구결과와 같았다(Zheng *et al.* 2024). 공간적으로 하구 습지는 담수와 해수가 섞이는 지역으로 pH가 공간적으로 변화하며 담수구간(pH 7.0~7.5), 혼합구간(pH 7.5~8.0) 그리고 해수구간(pH 8.0~8.6)으로 해수로 갈수록 pH가 증가하는 경향을 나타낸다. 본 연구가 진행된 만경강 습지에서 pH 8.0 이상의 알칼리성을 나타내 해수의 영향을 크게 받는 곳으로 판단된다(Ohrel and Register 2006A).

습지의 염도 변화의 중요한 요인은 강수량의 변화로 연구된 바 있다. Costa *et al.* (2018)에 따르면 우기에는 하천 유입수가 많아져 염도가 낮아지고 건기에는 담수 유입이 감소하여 염도가 상승한다고 분석하였다. 또한 우리나라는 여름철 강수량이 많아 여름철 하구습지의 염도 감소에 영향을 미칠

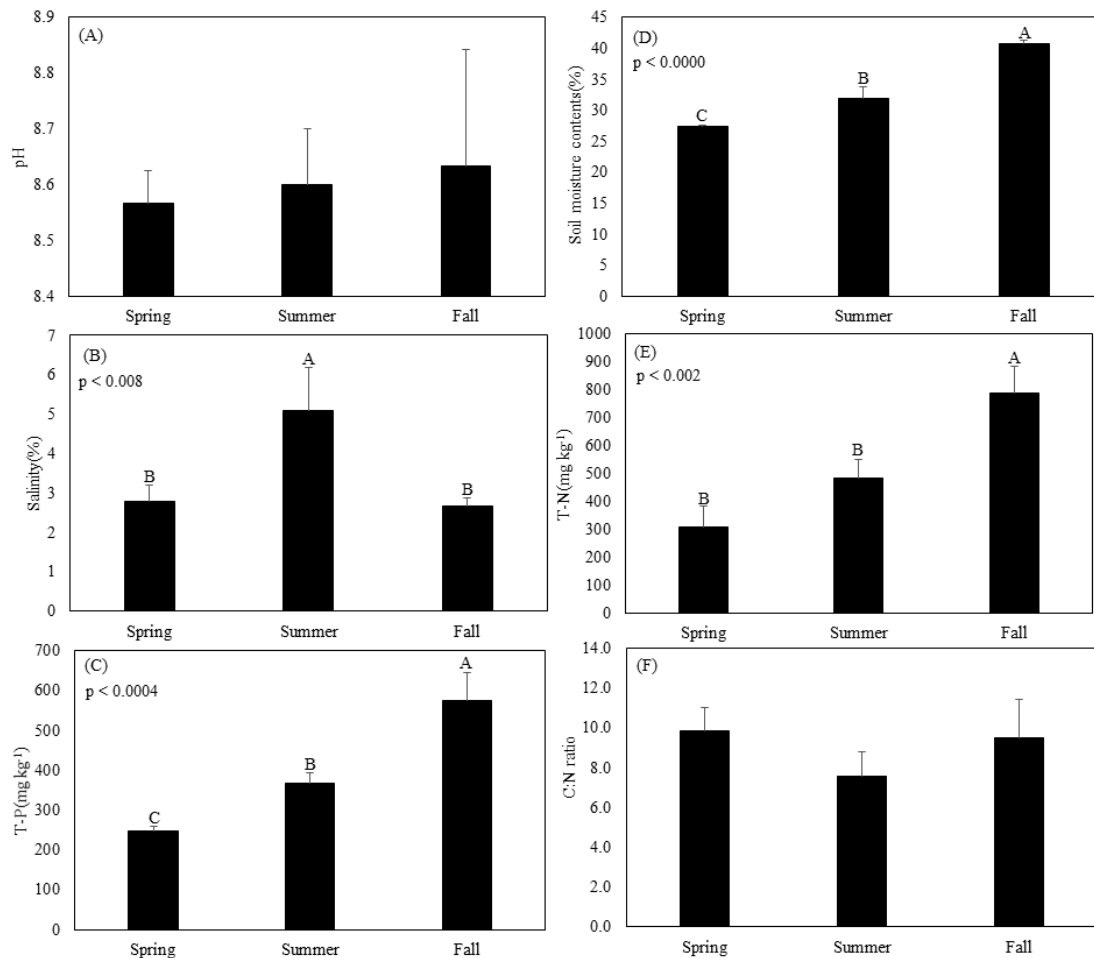


Fig. 8. Physico-chemical characteristics of soil in the Mankyong estuary wetland. Alphabets on the bars mean significantly different among the seasons.

것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 여름철 염도가 봄철과 가을철보다 많았는데 이는 여름철 조사가 8월 말에 수행되어 강우와 장마철 의한 영향이 적고 지속된 무더위에 의한 수분 증발로 수분함량이 많지 않았기 때문인 것으로 생각된다.

일반적으로 질소(N)와 인(P)은 생태계의 핵심 영양염류로서 생태계의 식물 및 미생물의 성장 등에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Ohrel and Register 2006B). Ohrel and Register (2006B)에 따르면 주변 농경지의 비료 사용 등 비점오염원 인해 습지의 질소와 인 농도가 상승할 수 있다. 그러나 본 연구 대상지는 농경지를 접하고 있으나 경계면을 따라 설치된 구거에 농업용수가 흐르고 또 산림을 접하고 있어 습지에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다. 따라서 본 습지는 토양 미생물 활동에 의해 유기물이 분해되어 자연적으로 질소와 인이 공급될 것으로 생각된다. 한편 장마가 끝나고 무더위를 지나 갈수기가 되면서 질소와 인의 농도가 증가하는 것으로 판단된다(Figure 8C and D). Xu *et al.* (2024)에 따르면 Beibu Gulf 하구의 질소와 인의 농도가 가장 높게 나타난 시기는 가을이며 이는 건기에 접어들며 담수 유입의 감소 및 영양염류 (NO_3^- , NH_4^+ , Soluble Reactive Phosphorus)가 축적되고 봄, 여름보다 식물플랑크톤 등의 활동이 감소하기 때문으로 분석 되었다.

하구습지의 C:N ratio는 탄소저장과 토양호흡 과정에서 핵심적인 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Wang *et al.* 2014; Xia *et al.* 2021; Wang *et al.* 2016). Wang *et al.* (2016)의 연구에 따르면 C:N ratio가 낮을 때 미생물이 활성화 되어 CO_2 가 증가하는 반면, C:N ratio가 높을 때 탄소의 장기저장이 가능하고 CO_2 방출이 억제되는 것으로 측정되었다. 특히 C:N ratio가 25보다 클 때 질소 부족 상태로 분해가 느려지고, 30보다 클 때 질소 제한으로 유기물 분해가 더 느려지고 탄소를 장기적으로 보존하는 것으로 분석된 바 있다(Wang *et al.* 2016). 본 연구에서 산정된 C:N ratio는 계절에 따라 6.5~11.7의 범위를 나타내고 있으므로 미생물 호흡에 의한 유기물의 분해가 지속적으로 진행되는 것으로 판단된다.

3.4 습지의 탄소저장능력과 토양의 물리화학적 특성간의 관계

탄소 저장량과 플럭스, 그리고 토양의 물리화학적 특성(수분함량, T-N, T-P, C/N비 그리고 pH)와의 상관분석을 실시한 결과는 Table 1과 같았다. 토양의 수분함량과 탄소 저장량은 강한 양의 상관관계를 나타냈고($r=0.915$, $p<0.005$), 이는 높은 수분함량은 탄소 저장 능력과 관련이 있음을 나타낸다. 습지의 탄소 저장량은 또한 총질소(T-N, $r=0.909$, $p<0.005$), 총인(T-P, $r=0.910$, $p<0.005$) 그리고 pH($r=0.865$, $p<0.005$)와

강한 양의 상관관계를 나타냈는데 이는 토양의 높은 질소와 인 그리고 pH가 탄소 저장량과 관련이 있음을 나타낸다. 그러나 토양의 탄소저장량은 C/N와 통계적인 관계가 나타나지 않았다. 한편 토양 호흡량은 토양의 물리화학적 특성들 중 C/N비와 음의 상관관계를 나타냈고 다른 특성들과는 통계적인 관계를 나타내지 않았다.

토양의 탄소저장량은 토양수분함량, 총질소(T-N), 총인(T-P) 그리고 pH와 높은 상관관계를 나타냈다. 이 결과는 하구습지 토양의 탄소저장량이 복합적인 토양 물리화학적 특성에 의해 조절됨을 의미한다. 토양수분과 탄소저장량 간의 상관관계는 습지의 혐기성 환경이 유기물 분해를 억제하여 탄소를 축적한다는 연구와 같았다. Dalton *et al.* (2023)은 토양수분 함량이 토양 유기탄소 저장의 지속성과 연관이 있으며 토양 건조시 탄소 소실이 발생할 수 있음을 연구하였다. 총질소 및 총인과 토양 탄소저장량 간의 상관관계는 영양염류가 미생물의 활성이 탄소 축적에 영향을 미친다는 것을 나타낸다. Wang *et al.* (2014)은 습지 토양의 영양염류가 탄소 저장과 미생물 분해 과정을 조절하는 요소임을 밝혔다. 질소와 인은 식물의 생산성을 증가시키고 동시에 미생물 군집을 활성을 변화시켜 유기물 분해와 축적에 영향을 미친다. pH와 토양의 탄소저장량 간의 상관관계는 pH가 미생물의 활성, 유기물 분해 속도에 영향을 미쳐 탄소 저장에 영향을 미친다는 것을 나타낸다. Dalton *et al.* (2023)은 pH 변화가 토양 유기탄소의 분해 속도를 조절하며 pH가 극단적으로 높거나 낮을 경우 탄소 소실이 발생할 수 있음을 보고하였다. 본 연구 대상지의 pH가 탄소저장량과 강한 양의 상관관계를 보이는 것은 해당 지역이 탄소 축적에 유리한 곳임을 의미한다. 토양수분은 pH와 영양염류의 이용 가능성에 영향을 미치고, 질소와 인은 미생물 활성과 식물의 생산을 통한 탄소 유입과 분해를 함께 조절한다. 이처럼 토양의 수분함량, 총질소, 총인 그리고 pH가 모두 탄소저장량과 복합적 상호작용 관계를 갖고 있으며 하구습지는 높은 탄소 저장고로서의 잠재력을 갖는다는 것을 뒷받침한다(Bansal *et al.* 2023; Villa *et al.* 2023; Xie *et al.* 2023). 하구습지의 토양 C:N ratio는 토양호흡의 중요한 조절 요인이다. 토양 C:N ratio와 토양호흡 사이의 음의 상관관계는 C:N ratio가 높을수록 미생물에 의한 분해가 억제되어 CO_2 방출이 감소한다(Wang *et al.* 2014). 반면, 토양 C:N ratio가 낮으면 미생물의 질소 제한이 약해져 토양호흡량이 증가하고 이는 곧 습지의 탄소저장 능력 감소로 이어진다. 결과적으로 앞서 설명한 대로 본 하구습지의 토양 탄소저장량과 토양호흡량은 토양의 물리화학적 특성 관계에

Table 1. The Pearson's correlation analysis among the physico-chemical properties in the soil. The values in the table mean the Pearson's correlation coefficient. The symbol(*) indicates statistical significance.

	SWC	T-N	T-P	C/N	pH
C storage	0.915**	0.909**	0.910	0.233	0.865**
C flux	-0.218	-0.191	-0.194	-0.653***	-0.056

***: $p<0.0005$, **: $p<0.005$, *: $p<0.05$

C storage: Carbon storage; C flux: Carbon flux; SWC: Soil Water Content; T-N: Total Nitrogen; T-P: Total Phosphorus; TOC: Total Organic Carbon; C/N: Carbon/Nitrogen ratio

따라 영향을 받아 동시에 조절작용이 일어난다고 할 수 있다. 향후 연구에서는 이들 인과관계 영향요인 및 메커니즘을 규명하고 계절적, 공간적 변동성을 고려한 모니터링을 통해 하구습지 탄소저장량의 모델을 활용하여야 할 것이다.

4. 결론

본 연구는 전라북도 만경강 하구습지를 대상으로 초본식생과 토양의 탄소저장량 및 토양호흡을 분석하고 이 과정에 영향을 미치는 토양의 물리화학적 특성을 분석하고자 하였다. 그 결과 하구습지는 계절과 식생 유형에 따라 탄소저장 및 방출 특성을 나타냈다. 갈대군락(*Phragmites communis* community)의 지상부 탄소저장량이 가장 높았고, 통통마디(*Salicornia europaea* community)와 칠면초(*Suaeda japonica* community) 군락은 상대적으로 낮았다. 토양의 탄소저장량은 가을에 현저히 증가하였는데, 이는 총유기탄소(TOC) 함량의 계절적 증가와 지하부 탄소 변화의 활성화에 따른 것으로 해석된다. 토양호흡량은 여름철에 가장 높았으며, 토양온도와 강한 양의 상관관계를 보여 온도가 미생물 호흡 활성화에 주요한 조절요인임을 확인하였다. 토양의 물리화학적 특성 중 수분함량, 총질소(T-N), 총인(T-P), pH는 탄소저장량과 유의한 양의 상관관계를 보였으며, 이는 수분과 영양염류의 공급이 유기물 분해 및 축적 과정에 복합적으로 작용함을 시사한다. 반면 토양호흡량은 C:N 비와 음의 상관관계를 보여, 질소 제한이 약화될수록 CO₂ 방출이 증가하고 탄소 저장 능력이 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 하구습지의 탄소 저장능력이 단순히 식생의 생산성뿐 아니라, 토양의 수분 상태, 영양염류, pH 등 다양한 환경 요인의 상호작용에 의해 결정됨을 보여준다. 특히 높은 수분함량과 알칼리성 환경은 유기물 분해를 억제하여 탄소 축적에 유리한 조건을 형성하는 것으로 분석되었다. 따라서 하구습지는 기후변화 완화를 위한 중요한 탄소흡수원으로서의 생태적 가치를 지니며, 향후 지속적인 모니터링과 모델링 연구를 통해 계절적·공간적 요인의 변동성을 포함한 탄소순환 메커니즘을 규명할 필요가 있다. 본 연구는 향후 국내 하구습지의 블루카본 관리 및 복원정책 수립을 위한 과학적 근거자료로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립생태원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIE-고유연구-2025-16).

References

Adame, M. F., Kelleway, J. J., Krauss K. W., Lovelock, C. E., Adams, J. B., Trevathan, T. S. M., Noe, G., Jeffrey, L., Ronan, M., Zann, M., Carnell, P. E., Iram, N., Maher, D. T., Murdiyarsa, D., Sasmito, S., Tran, D. B., Dargusch, P., Kauffman, J. B. and Brophy, L. (2024).

All tidal wetlands are blue carbon ecosystems. *BioScience*, Vol. 74(4), pp. 253-270

Bansal, S., Creed, I. F., Tangen, B. A., Bridgham, S. D., Desai, A. R., Krauss, K. W., Neubauer, S. C., Noe, G. B., Rosenberry, D. O., Trettin, C., Wickland, K. P., Allen, S. T., Arias-Ortiz, A., Armitage, A. R., Baldocchi, D., Banerjee, K., Bastviken, D., Berg, P., Bogard, M. J., Chow, A. T., Conner, W. H., Craft, C., Creamer, C., DelSontro, T., Duberstein, J. A., Eagle, M., Fennessy, M. S., Finkelstein, S. A., Göckede, M., Grunwald, S., Halabisky, M., Herbert, E., Jahangir, M. M. R., Johnson, O. F., Jones, M. C., Kelleway, J. J., Knox, S., Kroeger, K. D., Kuehn, K. A., Lobb, D., Loder, A. L., Ma, S., Maher, D. T., McNicol, G., Meier, J., Middleton, B. A., Mills, C., Mistry, P., Mitra, A., Mobilian, C., Nahlik, A. M., Newman, S., O'Connell, J. L., Oikawa, P., van der Burg, M. P., Schutte, C. A., Song, C., Stagg, C. L., Turner, J., Vargas, R., Waldrop, M. P., Wallin, M. B., Wang, Z. A., Ward, E. J., Willard, D. A., Yarwood, S. and Zhu, X. (2023). Practical guide to measuring wetland carbon pools and fluxes. *Wetland*. Vol. 43:105

Byun, C., Lee, E. J. and Kang, H. (2019). Estimation of carbon storage in coastal wetlands and its economic value in South Korea. *Journal of Ecology and Environment*, Vol. 43, 7.

Campbell A. D., Fatoyibo, L., Goldberg, L. and Lagomasino, D. (2022). Global hotspots of salt marsh change and carbon emissions. *Nature*. Vol. 612, pp. 701-706. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05355-z>

Chen, L., Liu, Z. T., Han G. X., Chu, X. J., Sun, B. Y., Liu, H. F. and Li, J. W. (2016). Effects of environmental and biotic factors on soil respiration in a coastal wetland in the Yellow River Delta, China. *Journal of Applied Ecology*. Vol. 27(6), pp. 1795-1803

Costa, C. R., Costa, M. F., Dantas, D. V. and Barletta, M. (2018). Interannual and seasonal variations in Estuarine water quality. *Frontiers in Marine Science*. Vol. 5, pp 301

Dalton, C., Imbrogno, J. J., McCue, M. M., Easley, R. A., Tong, Y. Y. and Chen, D. (2025). The effects of soil moisture and pH on soil organic carbon content in tidal freshwater marsh wetlands. *Journal of Freshwater Ecology*, Vol. 40(1), pp. 2465403

Douglas, T. J., Schuerholz, G. and Juniper, S. K. (2022). Blue carbon storage in a northern temperate estuary subject to habitat loss and chronic habitat disturbance: Cowichan Estuary, British Columbia, Canada. *Frontiers in Marine Science*, Vol. 9, 857586.

- Friess D. A., Adame, Shribman, Z. I., Stankovic, M., Iram, N., Baustian, M. M. and Ewers, L. C. J. (2024). Restoring blue carbon ecosystems. *Cambridge Prisms: Coastal Futures*. Vol. 2, pp. e9. <https://doi.org/10.1017/cft.2024.9>
- Han, Y. S., Lee, E. P., Park, J. H., Lee, S. Y., Lee, S. I. and You, H. Y. (2018). Organic carbon distribution and cycling in the *Quercus glauca* forest of Jeju Island, Korea. *Journal of Ecology and Environment*, Vol. 42, pp. 8.
- Hwang, J., Lee, K. W. and Park, H. (2022). Growth rate and annual production of Halo-phyte(*Sueada japonica*) on Tidal Mud-flat, Southern Part of Gangwa-lsl, Korea. *Ocean and Polar Research*. Vol. 44(2), pp. 127-137
- Hwang, J. H., Park, J. S., Han Y. S, Yarish C. and Kim J. K. (2025). Seasonal variations in biomass height, photosynthetic efficiency, and carbon and nitrogen contents of *Sueada japonica* in Incheon salt marshes (Korea). *Frontiers in Plant Science*. Vol. 16, 1513624
- IPCC (2006) IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
- Jeong, H. M., Jang, R. H., Kim, H. R. and You, Y. H. (2017). Soil CO₂ efflux in a warm-temperature and sub-alpine forest in Jeju, South Korea. *Journal of Ecology and Environment*, Vol. 41, pp. 23
- Jia, H., Wang, Y., Zhao, Y., Li, Y., Wang, G., Liu, J. and Wang, Y. (2024). Soil respiration and its response to climate change in Caohai wetland on Qinghai-Tibet Plateau. *Scientific Reports*, Vol. 14, pp. 8574.
- Kuwaie, T. (2015). Blue carbon in human-dominated estuarine and shallow coastal systems. *Ambio*, Vol. 44(3), pp. 263-278.
- Luo, Y and Zhou, X. (2006). Soil respiration and the environment. Academic Press, Burlington. pp. 79-105
- Macreadie, P. I, Anton, A., Raven, J. A., Beaumont, N., Connolly, R. M., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Kuwaie, 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 Duarte, C. M. (2019). The future of Blue Carbon science. *Nature Communications*. Vol. 10, 3998. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11693-w>
- Nie, M., Liu, M., Hou, L., Lin, X., Li, Y., Yan, C. and Ynag, Y. (2011). Seasonal variation of soil respiration and its influence factors in Tidal Flat of Yangtze Estuary. *Huanjing Kexue Xuebao/Acta Scientiae Circumstantiae*. Vol. 31(4), pp. 824-831
- Ohrel, R. L. and Register, K. M. (2006A). Chapter 11: pH and Alkalinity, In: Volunteer estuary monitoring. A methods manual(2nd edition). Environmental Protection Agency(EPA).
- Ohrel, R. L. and Register, K. M. (2006B). Chapter 10: Nutrients-Nitrogen and Phosphorus, In: Volunteer estuary monitoring. A methods manual(2nd edition). Environmental Protection Agency(EPA).
- Song, X., Gao, X., Zhao, X., Wu, P., Dyson, K. E. and Wang, Z. (2021). Dynamics of the soil respiration response to soil moisture in three Chinese grasslands. *Scientific Reports*, Vol. 11, pp. 1923.
- Sousa, A. I., Lillebø, A. I., Pardal, M. A. and Caçador, I. (2010). Productivity and nutrient cycling in salt marshes: contribution to ecosystem health. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 87(4), pp. 640-646.
- Suwandhahannadi, W. K., Weragoda, S. K., Zoysa, K., Atwood, T. B. and Huxham, M. (2024). Blue carbon storage in a tropical coastal estuary:Insight for conservation priorities. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 199, pp. 115950.
- Villa, J. A., Bohrer, G., Ju, Y., Wrighton, K, Johnson, N. and Kinsman-Costello, L. (2023). Carbon sequestration and nitrogen and phosphorus accumulation in a freshwater, estuarine marsh: Effects of microtopography and nutrient loads. *Geoderma*, Vol. 430, pp. 116349
- Watson, E. B., Bahman, F. I., Woolfolk, A., Meyer, R., Maher, N., Wigand, C. and Gray, A. B. (2022). High nutrient loads amplify carbon cycling across California and New York coastal wetlands but with ambiguous effects on marsh integrity and sustainability. *PLOS One*, Vol. 9, pp. e273260
- Wang, J., Bai, J., Zhao, Q., Lu, Q. and Xia, Z. (2016). Five-year change in soil organic carbon and total nitrogen in coastal wetlands affected by flow-sediment regulation in a Chinese delta. *Scientific reports*. Vol. 6, pp. 21137
- Wang S. R., Iorio, D. D., Cai W. J. and Hopkinson, C. S. (2017). Inorganic carbon and oxygen dynamics in a marsh-dominated estuary. *Limnology and Oceanography*. Vol. 63(1), pp. 47-71. <https://doi.org/10.1002/lno.10614>
- Wang, W., Sardans, J., Zeng, C., Zhong, C., Li, Y. and

- Peñuelas, J. (2014). Responses of soil nutrient concentrations and stoichiometry to different human land uses in subtropical tidal wetland. *Geoderma*, Vol. 1, pp. 232–234
- Xia, S., Song, Z., Li, Q., Guo, L., Yu, C., Singh, B. P., Fu, X., Chen, C., Wang, Y. and Wang, H. (2021). Distribution, sources, and decomposition of soil organic matter along a salinity gradient in estuarine wetlands characterized by C:N ratio $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{15}\text{N}$, and lignin biomarker. *Global Change Biology*, Vol. 27, pp 417–434
- Xie, M., Qian, L., Dong, H., Mei, W., Fu, X., Hu, Y., Yan, J., Sun, Y., Wu, P., Chen, X. and Wang, L. (2023). The high organic carbon accumulation in estuarine wetland necessarily does not represent a high CO₂ sequestration capacity. *Environment International*. Vol. 172, pp. 107762
- Xu, S., Xiao, Y., Xu, Y., S, Li., Cai, Y., Qi, Z., Liu, Y., Chen, Z. and Lakshmikanda, M. (2024). Effects of seasonal variations and environmental factors on phytoplankton community structure and abundance in Beibu Gulf, China. *Ocean and Coastal Management*. Vol. 248, pp. 10682
- Yuan, Y., Xue, L., Li, X., Wang, C., Liu, H., Xiao, Y. and Liu, H. (2022). Net primary productivity and carbon sequestration potential of salt marsh in eastern China. *Chinese Journal of Ecology*, Vol. 41(2), pp. 334–342.
- Zheng, Y., Su, F., Li, H., Song, Fei., Wei, C. and Cui, Panpan. (2024). Structure and function of soil bacterial communities in the different wetland types of the Liaohe Estuary wetland. *Microorganisms*. Vol. 12(10), pp. 2075