

금강 하천 습지에서의 탄소 저장 및 거동의 계절적 및 공간적 변화 연구

장인영 · 이응필 · 한상학 · 정현모**

국립생태원

Seasonal and Spatial Variations in Carbon Storage and Dynamics in the Geumgang River Wetlands

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

National Institute of Ecology, Seocheon, Korea

(Received : 27 October 2025, Revised : 22 November 2025, Accepted : 22 November 2025)

요약

전지구적 탄소순환에서 생태계는 대기 중 이산화탄소를 흡수하고 저장하며, 다시 방출하는 과정을 통해 지구의 탄소 균형을 유지하는 중요한 역할을 한다. 일차생산자는 광합성을 통해 대기 중의 이산화탄소를 유기물 형태로 고정하고, 이렇게 고정된 이산화탄소는 생물의 호흡작용으로 다시 대기 중으로 방출된다. 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 습지 중 86%의 면적을 차지하고 있는 하천습지를 대상으로 하천습지의 탄소 저장·배출에 대한 실험을 진행하였다. 금강 유역에 위치한 4 가지 유형의 습지-배후습지, 하도습지, 보습지, 하구습지-를 대상으로 계절별로 토양을 채취하여 토양 특성 및 탄소를 분석함과 동시에 토양 호흡을 측정하였다. 그 결과, 토양에 저장된 탄소의 양은 배후습지에서 $16.63 \pm 3.97 \text{ MgC ha}^{-1}$, 하도습지 $13.77 \pm 13.66 \text{ MgC ha}^{-1}$, 보습지의 경우에는 $6.44 \pm 3.35 \text{ MgC ha}^{-1}$, 마지막으로, 하구습지는 $6.69 \pm 3.14 \text{ MgC ha}^{-1}$ 로 배후습지와, 하도습지가 보습지와 하구습지보다 유의하게 높은 것을 확인할 수 있었다. 이러한 토양 탄소 저장량의 경우, 총질소, 총인 등의 영양염류와 높은 상관관계를 보였다. 토양 호흡의 경우, 배후습지, 하도습지, 보습지, 하구습지는 각각 $0.87 \pm 0.96 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$, $0.30 \pm 0.36 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$, $0.32 \pm 0.20 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$, $0.38 \pm 0.26 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 의 값을 기록하였으며, 배후습지의 값이 다른 습지에 비해 유의하게 높은 값을 나타내었으며, 여름의 호흡량이 $0.81 \pm 0.84 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$, 봄-가을철의 호흡량은 각각 $0.28 \pm 0.20 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$, $0.35 \pm 0.40 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 으로 여름이 봄-가을에 비해 높은 값을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 토양 호흡량은 모든 습지에서 온도와 양의 상관관계를 나타냈다. 하지만, 영향 정도는 다르게 나타났으며, 배후습지의 경우에는 상관성이 낮게 나타난 반면($r=0.346$), 하도습지($r=0.452$)와 보습지($r=0.451$)는 중간정도의 상관관계를 나타냈으며, 하구습지의 경우에는 가장 큰 상관관계를 나타냈다($r=0.728$).

핵심용어 : 하천습지, 토양 탄소 저장, 토양 호흡, 환경요인

Abstract

In the global carbon cycle, ecosystems play a crucial role in maintaining the Earth's carbon balance by absorbing and storing atmospheric carbon dioxide and then releasing it again. Primary producers fix atmospheric carbon dioxide into organic matter through photosynthesis, and the fixed carbon is subsequently released back into the atmosphere through respiration. Wetland ecosystems, in particular, are known to store large amounts of carbon per unit area compared to other ecosystems, owing to their high productivity coupled with low decomposition rates. This study conducted experiments on carbon storage and emissions in riverine wetlands, which constitute 86% of domestic wetlands. Soil samples were collected seasonally from four wetland types in the Geumgang River basin—backswamp, riverine wetland, lacustrine wetland, and estuarine wetland to analyze soil properties and carbon

*To whom correspondence should be addressed.

National Institute of Ecology, Seocheon, Korea
E-mail : eimple01@nie.re.kr

• Inyoung Jang Senior Researcher(iyjang@nie.re.kr)
• EungPill Lee National Institute of Ecology/Associate Researcher(ecoman21@nie.re.kr)
• Snaghak Han National Institute of Ecology/Researcher(hsh2334@nie.re.kr)
• HeonMo Jeong National Institute of Ecology/Researcher(eimple01@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.

content, while soil respiration was measured simultaneously. The results showed that the amount of carbon stored in the soil was $16.63 \pm 3.97 \text{ MgC ha}^{-1}$ in backswamp, $13.77 \pm 13.66 \text{ MgC ha}^{-1}$ in riverine wetland, $6.44 \pm 3.35 \text{ MgC ha}^{-1}$ in lacustrine wetland, and $6.69 \pm 3.14 \text{ MgC ha}^{-1}$ in estuarine wetland. This confirmed that backswamp and riverine wetlands had significantly higher values than lacustrine wetland and estuarine wetland. These soil carbon stocks showed a strong correlation with nutrient concentrations such as total nitrogen(TN) and total phosphorus(TP). For soil respiration, the values for backswamp, riverine, lacustrine, and estuarine wetlands were $0.87 \pm 0.96 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, $0.30 \pm 0.36 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, $0.32 \pm 0.20 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, and $0.38 \pm 0.26 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectively. The backswamp exhibited significantly higher values than the other wetland types. Seasonal variation showed that summer respiration rates ($0.81 \pm 0.84 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) were higher than those in spring ($0.28 \pm 0.20 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) and autumn ($0.35 \pm 0.40 \text{ gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Soil respiration showed a positive correlation with temperature in all wetlands. However, the degree of influence varied: backswamp showed a low correlation ($r = 0.346$), riverine wetland ($r = 0.452$) and lacustrine wetland ($r = 0.451$) exhibited moderate correlations, and estuarine wetland showed the strongest correlation ($r = 0.728$).

Key words : Wetland carbon, Soil Carbon Storage, Soil Respiration, Environmental Factors

1. 서론

최근 기후변화가 심화됨에 따라, 생태계에서의 탄소 저장 및 거동에 관한 관심이 높아지고 있다. 화석 연료 사용 등에 의해 대기 중으로 배출된 이산화탄소는 일차생산자의 광합성에 의해 다시 생태계 내로 흡수되며, 생산자 및 소비자, 분해자의 호흡에 의해 다시 대기 중으로 방출되게 된다. 이때 흡수하는 양과 방출하는 양의 차이만큼 생태계에 저장이 되는데, 최근 이러한 기작으로 생태계 내에 축적·저장되는 탄소에 대한 관심이 커지고 있다. 다양한 생태계 중 습지는 지구 탄소 순환에서 핵심적인 역할을 하는 생태계로 알려져 있다. 습지의 경우, 일정기간 물에 잠겨있는 형태의 생태계이기 때문에, 타 생태계에 비해 유기 탄소의 분해가 더디게 나타나게 되어, 흡수된 탄소가 유기물 형태로 토양에 저장되게 된다(Adhikari et al., 2009; Mitsch et al., 2013; Nahlik and Fennessy, 2016; Mitsch and Mander, 2018). 이러한 과정은 습지의 수문학적 특성과 산소 부족 상태에 크게 영향을 받는다. 습지의 일차생산자들에 의해 흡수된 이산화탄소는 식물체에서 유기물로 전환이되며, 이러한 일차생산자들이 고사하면, 토양에 저장되게 된다. 그러나 습지는 물로 포화된 상태이기 때문에 토양의 혐기적 환경이 조성되어, 미생물에 의한 분해가 느리게 나타나 유기물이 완전히 분해되지 않고 점차 퇴적층에 쌓인다. 이러한 과정을 통해 습지 토양에 많은 양의 탄소가 분해되지 않고 저장되게 된다. 실제로 전 세계 육지 면적의 6~9%에 불과한 습지가 지구 토양 탄소의 약 30% 이상을 저장하고 있는 것으로 알려져 있다(Jackson et al., 2017; Poulter et al., 2021; Zhang et al., 2021).

우리나라의 경우 2704개의 습지가 분포하고 있는 것으로 알려져 있으며, 전체 습지 면적은 1,153.4km²로 보고되고 있다(National Institute of Ecology, 2022). 우리나라 「습지보전법」에서는 습지를 크게 연안습지, 내륙습지, 인공습지의 3개 유형으로 분류하고 있으며, 이를 세분화 하여 33개 세부유형으로 분류한다. 특히, 내륙습지는 하천형, 호수형, 산지형으로 분류하고 있으며, 각각 7개, 5개, 4개의 세부유형으로 분류된다. 이 중 가장 넓은 면적을 차지하고 있는 것은

하천형 습지로, 국내 전체습지의 86%를 차지하고 있다. 본 연구에서는 하천형 습지 중, 배후습지(backswamp), 하도습지(riverine wetland), 보습지(lacustrine wetland), 하구습지(estuarine wetland)를 대상으로 연구를 진행하였다. 이 네 습지는 모두 하천과 밀접한 관련을 가지지만, 형성 원인과 환경적 특성에서 뚜렷한 차이를 보인다. 먼저, 배후습지는 하천의 범람원 내, 자연 제방 뒤쪽의 낮은 지형에 형성되는 습지이다(Wharton, 1982). 하천이 범람할 때 범람수가 제방을 넘으며 일시적으로 고이는 지역으로, 배수가 잘되지 않아 물이 오래 머물고 점토질의 미세한 퇴적물과 유기물이 축적된다. 이러한 환경은 배수 불량과 낮은 산소 농도를 특징으로 하며, 홍수 시에는 물을 일시적으로 저장하여 범람을 완화하고, 평상시에는 유기물 분해 및 영양염류 저장의 기능을 수행한다. 하도습지는 하천의 본류나 지류를 따라 형성되며, 하천의 흐름과 직접적으로 연결되어 있는 습지이다. 물의 흐름이 일정하게 유지되고 주기적인 범람과 퇴적이 발생하기 때문에 수위 변동이 크고, 담수성 생태계가 발달한다. 이 습지는 하천 생태계의 중요한 일부로, 오염물질을 여과하여 수질을 정화하고, 어류나 양서류의 산란지, 조류의 먹이터로 기능하며 생물다양성을 유지하는 역할을 한다. 보습지는 인위적으로 형성된 저수지나 댐 주변에 발달하는 저류형 습지로, 자연적인 하천 습지와 달리 인간의 수자원 관리 활동에 의해 영향을 받는다. 수위 조절로 인해 주기적으로 침수와 노출이 반복되며, 이에 따라 수생식물의 분포와 생태 구조가 변동한다. 이 습지는 저수지의 수질 정화, 영양물질 흡수, 그리고 홍수 시 완충지대의 역할을 수행한다. 마지막으로 하구습지는 하천이 바다로 유입되는 지점에 형성되는 지역으로, 담수와 해수가 만나 염분 농도가 변화하는 기수역이다. 조석 작용과 담수 유입이 복합적으로 작용하여 수온, 염분, 영양염 농도가 시시각각 변동하며, 그로 인해 매우 높은 1차 생산성과 풍부한 생물다양성을 보인다. 하구는 어패류의 산란과 성장의 요람이자, 육상과 해양 생태계를 연결하는 중요한 생태적 전이 구역이다. 배후습지, 하도습지, 보습지는 내륙습지의 성격을 보이는 반면, 하구습지는 염분의 영향을 받는 연안습지의 특징도 보인다는 차이가 있다.

본 연구에서는 우리나라 습지의 탄소 저장능력 및 토양 호흡량을 분석하고, 이에 영향을 주는 인자를 분석하여 탄소 저장을 위한 관리 방안을 마련하기 위해 국내에서 가장 넓은 면적을 차지하고 있는 하천습지 대상으로 하천습지의 계절별세부유형별 탄소 저장 및 토양 호흡을 산정하고, 토양 수분함량, pH 등 토양특성과의 상관관계를 알아보는 연구를 진행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구지역 정보

본 연구는 하천습지의 세부 유형 중 면적이 가장 크게 나타난 4가지 유형-배후습지, 하도습지, 보습지, 하구습지-의 습지에서 수행하였다(Table 1). 연구 대상지역은 금강유역에 위치한 습지로 선정하였다. 배후습지는 충남 공주시 우성면에 위치하며(Fig. 1), 면적은 27,076m²에 해당한다. 우점군락으로는 물참새피군락, 줄군락이며, 층위별 주요 수종으로는 교목층에 선버들, 초본층에 줄, 물참새피, 갈대, 부들 등이 나타났다. 하도습지의 경우에는 충남 부여군 은산면에 위치하고 있는 용두습지에서 진행하였으며(Fig. 1), 해당 습지의 면적은 194,122m²에 해당하고 우점군락으로는 달뿌리풀군락이며, 층위별 주요 수종으로는 교목층에 버드나무, 갈참나무, 밤나무, 왕버들, 초본층에 달뿌리풀이 나타났다. 보습지는 충남 청양군 남양면에 위치한 금정습지에서 진행하였다. 금정습지의 면적은 400,635m²이며, 우점군락은 달뿌리풀군락, 달뿌리풀-갈대군락, 달뿌리풀-억새군락이며, 층위별 주요 수종으로는 교목층에 버드나무, 상수리나무, 아까시나무, 초본층에 달뿌리풀, 갈대, 물억새, 환삼덩굴, 줄 등이 나타났다. 마지막으로 하구습지는 전북 김제시 진봉면 고사리에 위치한 동진강하구습지에서 실험을 진행하였으며(Fig. 1), 해당 습지의 우점군락으로는 갈대군락, 통통마디군락이며, 주요 식물종으로는 갈대, 통통마디, 해홍나물, 칠면초, 나문재, 모새달, 억새 등이 나타났다.

2.2 샘플 채취 및 분석

연구 대상 지역 토양의 일반적 특성 분석을 위해서 2024년 봄, 여름, 가을의 3계절에 걸쳐 조사지역 습지에서 각각 3개 지역에서 깊이 10cm의 토양을 채취하였다. 또한, 봄철의 경우, 토양의 용적밀도(bulk density)를 계산하기 위하여

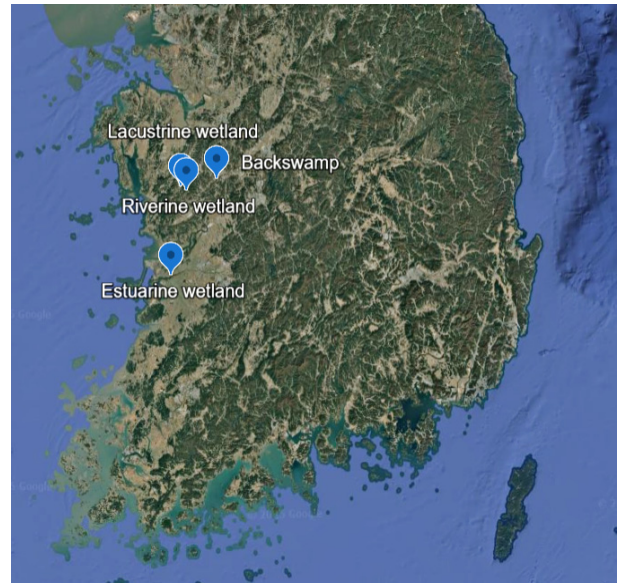


Fig. 1. Map of study sites

100ml 토양 코어(core)를 활용하여 토양을 채취하였다. 토양 분석 항목은 토양을 완전히 건조하여 건조 전, 후의 무게차를 건조 후의 무게로 나누는 중량수분함량(gravimetric water content), 토양유기물함량(soil organic matter), pH, 토양용적밀도, 토성(soil texture), 총인(T-P: total phosphorus), 총질소(T-N: total nitrogen)를 분석하였으며, 토양 분석은 공인시험기관(서울대학교 농생명과학공동기기원)에 의뢰하여 수행하였다.

토양 유기 탄소 함량(SOC, Soil Organic Carbon)의 경우, 토양 유기물 함량에서 탄소 비율(0.58)을 곱해서 계산하였다(Buringh, 1984). 토양 탄소 함량과 토양 깊이, 용적밀도를 활용하여 토양 탄소 저장량을 산정하였다. 본 연구에서는 토양 탄소 저장량 뿐만 아니라, 토양에서 토양 호흡으로 발생하는 이산화탄소를 측정하여, 습지에서 발생하는 이산화탄소를 측정하고자 하였다. 토양 호흡은 습지 내·외부에서 이동형 토양호흡 측정장치(EGM-5, USA, PP-system)를 활용하여 조사별로 오전 10시에서 오후 2시 사이에 9회 측정하였다. 이 중 습지 내부의 토양 호흡은 습지 내부 중물에 잠겨있지 않고 공기 중에서 노출된 토양을 찾아 토양호흡을 산정하였다. 토양 호흡 측정과 동시에, 안정적인 토양 온도 측정이 가능한 깊이인 10cm 깊이에서의 토양 온도도 함께 기록하였다.

Table 1. Location, area, and dominant species of the study wetlands

Wetland Type	Location		Area(m ²)	Dominant Species
	Latitude	Longitude		
Backswamp	36.452436	127.081092	27,076	<i>Paspalum distichum</i> , <i>Zizania latifolia</i>
Riverine wetland	36.380766	126.847447	194,122	<i>Phragmites japonica</i>
lacustrine wetland	36.406998	126.803977	400,635	<i>Phragmites japonica</i>
Estuarine wetland	35.864343	126.726755	44,176,755	<i>Phragmites australis</i> , <i>Salicornia europaea</i>

2.3 통계분석

측정된 토양 호흡량 및 온도 데이터는 계절별, 습지 유형별로 정리·분석하여 평균값을 산정하였으며, 또한, 계절별 및 습지 유형별 통계적 유의한 차이 분석을 위해 반복측정 분산분석(Repeated-measure ANOVA)를 이용하였다. 또한, 토양 탄소 함량과 토양 특성값들과의 상관성 분석을 위해, 습지 내·외부를 나누어 토양 유기 탄소 함량(SOC)과 기타 다른 토양 특성과의 상관분석(Pearson correlation)을 실시하였다. 이때 통계분석은 SPSS(ver. 18.0.0, SPSS Inc.)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 토양 특성

네 가지 다른 유형의 습지에서의 토양 특성은 유형에 따라 다른 경향을 보였다. 우선 토성의 경우, 배후습지는 미사질 양토(silt loam), 하도습지는 사토(sand), 보습지는 양질사토(loamy sand), 하구습지는 사양토(sandy loam)로 조사되었다. 배후습지의 경우, 미사(silt)의 함량이 제일 높았으며, 하도습지는 점토(clay)가 대부분을 차지하고 있었다. 보습지와 하구습지는 모래 함량이 높았으나 그 양이 보습지에 비해

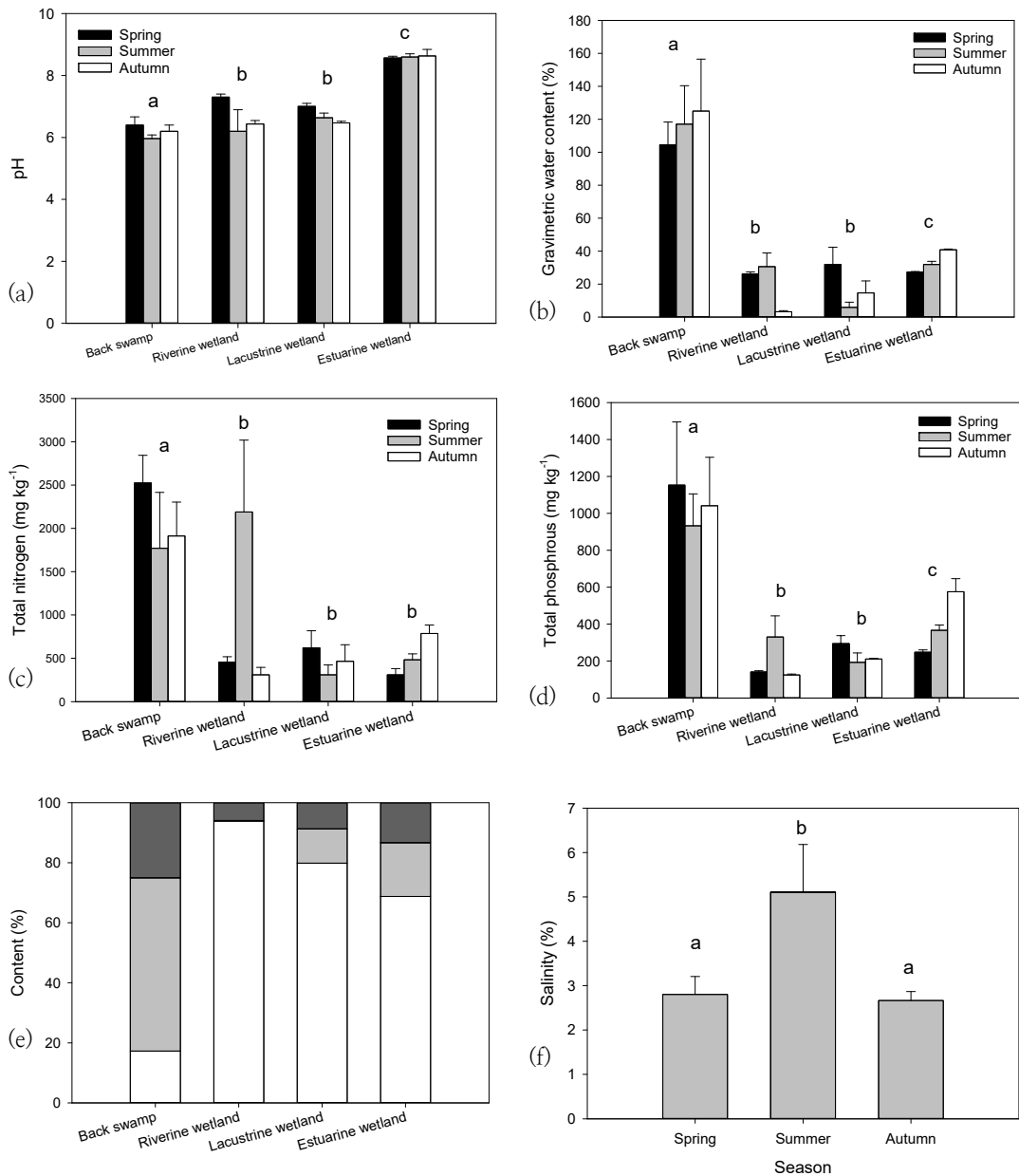


Fig. 2. Differences of soil properties (~10cm) with wetland types (a) pH, (b) Gravimetric water content, (c) T-N, (d) T-P, (e) Soil texture (White bar: sand, Gray bar: silt, Black bar: clay), (f) Salinity in estuarine wetland soils.

많지 않았으며, 미사와 점토(clay)가 비슷한 비율로 존재하였다. 배후습지의 경우 홍수 시 범람으로 형성되는 습지이기 때문에 유속이 느려 상대적으로 실트가 높은 비율을 차지하게 된다(Chen et al., 2020). 반면 하도습지의 경우, 유속이 빠른 하천의 영향을 받는 습지이기 때문에 다른 습지에 비해 모래의 함량이 매우 높은 것으로 나타났다. 습지의 토성의 변화는 습지에 영향을 미치는 수체의 유속과 많은 연관성이 있다(Palmer and Ruhi, 2019). 본 연구 결과에서도 유속이 빠른 하도에 생성되는 하도습지와 유속이 느린 지역에 생성되는 배후습지에서 토성의 큰 차이가 나타났다. 반면 다른 토성들의 경우, 배후습지와 하구습지는 다른 두 습지와 유의한 차이를 나타내는 항목이 많았으며, 하도습지와 보습지는 모든 항목에서 비슷한 결과를 보였다. pH의 경우, 배후습지는 6.2 ± 0.3 의 가장 낮은 값을 보였으며, 하도습지는 6.6 ± 0.6 , 보습지는 6.7 ± 0.3 으로 비슷한 값을 나타냈으며, 하구습지는 8.6 ± 0.1 의 값을 나타내 가장 높은 값을 기록하였다($p < 0.05$, Fig. 2(a)). 일반적으로 하구습지의 경우, 해수의 영향을 받는 습지로 해수의 염분의 영향으로 내륙 습지에 비해 높은 pH를 나타내는 것으로 알려져 있다(Seybold et al., 2002; Bai et al., 2016). 중량수분함량의 경우, 배후습지는 $115.52 \pm 22.60\%$ 로 유의하게 높은 값을 기록하였으며($p < 0.001$), 하구습지가 $33.33 \pm 5.99\%$ 로 그 다음 값을 기록하였다. 하도습지와 보습지의 경우, 각각 $19.99 \pm 13.41\%$, $17.48 \pm 13.24\%$ 로 중간의 값을 보였다(Fig. 2(b)). 중량수분함량 역시 배후습지가 가장 높게 나타났는데, 이는 미세한 토양 성분일수록 공극이 많아 상대적으로 많은 양의 수분을 함유할 수 있어 높은 수분 함량을 기록한 것으로 보인다. 실제 Li et al. (2022)의 연구에 의하면 미사의 함량이 높을수록 토양수분함량이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 총질소, 총인의 영양염류의 경우 배후습지가 유의하게 높은 값을 기록하였다. 총질소의 경우, 배후습지가 $2,068.89 \pm 536.53 \text{ g kg}^{-1}$ 를 보여 가장 높은 값을 기록하였으며, 하도습지, 보습지, 연안습지의 경우 각각 $985.56 \pm 997.38 \text{ g kg}^{-1}$, $466.67 \pm 200.56 \text{ g kg}^{-1}$, $526.67 \pm 220.34 \text{ g kg}^{-1}$ 로 나타났으며, 이 세 지역의 값은 유의한 차이를 보이지 않았다(Fig. 2(c)). 또 다른 영양염류의 중요한 지표인 총인의 경우 배후습지가 $1042.44 \pm 250.94 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 나머지 세 습지에 비해 유의하게

높은 값을 나타냈으며, 연안습지가 $396.58 \pm 148.62 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 두 번째로 높은 값을 기록하였으며, 나머지 하도습지와 보습지가 $198.57 \pm 114.40 \text{ mg kg}^{-1}$, $232.54 \pm 57.45 \text{ mg kg}^{-1}$ 의 값을 기록하였다(Fig. 2(d)). 하도습지나 보습지처럼 수체의 영향을 많이 받는 습지의 경우, 수체의 흐름 때문에 상대적으로 유기물이나 영양염류의 퇴적이 적게 일어난다(Carter, 1996). 따라서, 이러한 하도습지나 보습지의 영양염류 농도가 낮게 나타난다. 마지막으로 하구습지의 경우에는 내륙습지와 다르게, 해수의 영향을 받게 되어, 염도(salinity)가 토성에 중요한 영향을 미치게 된다. 따라서, 하구습지를 대상으로 염도를 측정할 결과 토양 염도의 경우 2.4~5.86% 값의 범위에서 나타났으며, 계절적으로 유의한 차이를 나타냈다(Fig. 2(f)). 봄($2.80 \pm 0.41\%$)-가을($2.67 \pm 0.20\%$)에 비해 여름($5.10 \pm 1.08\%$)에 유의하게 높은 값을 나타냈는데, 이는 여름의 높은 기온으로 토양의 수분함량이 줄어들면서 상대적으로 염분이 농축되는 효과가 나타난 것으로 보인다.

3.2 토양 탄소 저장량

본 연구 대상지인 4개의 서로 다른 유형의 습지에서 토양 탄소 저장량을 산정한 결과, 토양탄소함량의 경우 배후습지, 하도습지, 보습지, 하구습지의 순으로 나타났으며 각각 $2.67 \pm 0.67\%$, $1.01 \pm 1.00\%$, $0.50 \pm 0.24\%$, $0.47 \pm 0.22\%$ 의 값을 기록하였다. 토양 탄소 함량과 토양 용적밀도 및 토양 깊이를 활용하여 산정한 토양 탄소 저장량은 배후습지에서 $16.63 \pm 3.97 \text{ MgC ha}^{-1}$, 하도습지 $13.77 \pm 13.66 \text{ MgC ha}^{-1}$, 보습지 $6.44 \pm 3.35 \text{ MgC ha}^{-1}$, 하구습지 $6.69 \pm 3.14 \text{ MgC ha}^{-1}$ 였다(Fig. 3). 통계 분석 결과 다른 습지에서는 토양 탄소저장량의 계절적 차이는 나타나지 않았으나, 하도습지에서는 약한 차이를 나타내었다 ($p < 0.01$). 배후습지와 하도습지가 보습지와 하구습지보다 유의하게 높은 것을 확인할 수 있었다. 토양 탄소 저장량은 토성, 온도, 수분함량, 식생유형 등에 의해 많은 영향을 받는다. 특히, 토성의 경우는 유기물의 결합 등을 통한 유기물 저장의 안정성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Kögel-Knabner et al., 2008; Kleber et al., 2015; Cotrufo and Lavelle, 2022). 일반적으로 미사와 점토 등 미세입자가 많은 토양은 물리적, 화학적 과정을 통해 유기물의 분해가 적게 일어난다고

Table 2. Analysis of soil characteristics (~10cm) in four different types of wetlands.

	Bulk Density (g cm ⁻³)	Total Organic Carbon (%)	Soil organic carbon (Mg C ha ⁻¹)	Gravimetric water content (%)	pH	Soil texture	Total nitrogen (g/kg)	Total phosphorus (mg/kg)
Backswamp	0.63 ± 0.05	2.67 ± 0.67	16.63 ± 3.97	115.52 ± 22.60	6.2 ± 0.3	Silt loam	2068.89 ± 536.53	1042.44 ± 250.94
Riverine wetland	1.36 ± 0.04	1.01 ± 1.00	13.77 ± 13.66	19.99 ± 13.41	6.6 ± 0.6	Sand	985.56 ± 997.38	198.57 ± 14.40
lacustrine wetland	1.27 ± 0.11	0.50 ± 0.24	6.44 ± 3.35	17.48 ± 13.24	6.7 ± 0.3	Loamy sand	466.67 ± 200.56	232.54 ± 7.45
Esturaine wetland	1.27 ± 0.11	0.47 ± 0.22	6.67 ± 3.14	33.33 ± 5.99	8.6 ± 0.1	Sandy loam	526.67 ± 220.34	396.58 ± 48.62

알려져 있다(Six et al., 2002; Hassink, 1997). 물리적 측면에서, 미사와 점토 입자는 토양입단(microaggregate)을 형성하여 유기물을 구조적으로 안정화하여 미생물이 분해하는 것을 어렵게 한다. 또한, 미세입자는 공극 크기가 작아 산소 확산이 제한되면서 호기적 분해가 억제된다 (Kaiser and Guggenberger, 2000; Hassink, 1997). 화학적 측면에서는, 미세입자표면에 유기물이 결합함으로써 장기적으로 토양 유기 탄소가 안정화된다(Oades, 1988; Kleber et al., 2005), 토양의 pH와 표면 전하 특성 또한 유기물 결합과 보호에 영향을 준다(Kaiser and Guggenberger, 2000). Li et al. (2020)은 토성에 따른 공극의 변화가 토양의 수분함량에 영향을 주어 공극 내 탄소 분해에 영향을 미치고, 궁극적으로는 토양 저장량에 영향을 미치는 것을 확인하는 실험을 진행하였다. 또한, 토양 탄소 함량은 토양의 수분함량에 많은 영향을 받는다. 토양 유기물 분해 기작은 미생물에 의해 영향을 받는데, 이러한 미생물은 수분함량과 온도에 많은 영향을 받는다(Zelles et al., 1991; Vas Gestel et al., 1993; Curiel Tuste et al., 2007; Długos et al., 2024). 토양 탄소 저장량은 많은 요인에 의해 결정되기 때문에, 습지 유형에 따라 다르게 나타난다. 본 연구에서도 배후습지와 하도습지가 보습지나 하구습지에 비해 더 높은 탄소 저장량을 나타내었다.

본 연구에서 토양 탄소 저장량과 다른 토양 특성과의 상관관계 분석을 실시한 결과, 습지 유형에 따라, 영향 인자들이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 배후습지의 경우, 타 토양 특성과의 상관관계는 거의 나타나지 않았으나, 총질소와 약한 상관관계를 보이고 있었다($r=0.780$, $p=0.013$). 하도습지의 경우, 연구 대상지였던 네 습지 중 수체의 영향을 가장 많이 받아 형성되고 유지되는 습지인 만큼 상대적으로 pH($r=-0.707$, $p=0.33$)와 총질소($r=0.994$, $p<0.001$), 총인($r=0.981$, $p<0.001$)의 영향을 많이 받는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 하도습지는 영양염류의 영향이 크게 나타났다. 보습지는 TN과 높은 상관관계($r=0.945$, $p<0.000$)를

보였다. 일반적으로 보습지와 같이 정체된 수역에서는 주로 인(P)이 제한 요인인 것으로 알려져 있지만, 본 연구의 대상 지역은 P 보다는 N과 더 높은 상관관계를 보이고 있었다. Mischler et al. (2014)는 인의 농도가 상대적으로 안정적인 정체된 수역에서는 상대적으로 N이 더 중요한 요인으로 작용한다는 것을 확인하였다. 본 연구에서도 총인의 농도가 타 지역과 차이가 크지 않은 것을 미루어, N이 중요한 요인으로 작용하고 있음을 알 수 있었다. 연안습지의 경우는 토양 수분 함량($r=0.938$, $p<0.001$), TN($r=0.936$, $p<0.001$), TP($r=0.922$, $p<0.001$)과 강한 양의 상관관계를 보였다. Kim et al. (2022)의 연구에서도, 국내 연안에서 질소와 인이 계절별로 다양하게 제한요인으로 작용하는 것을 확인하였다.

3.3 토양 호흡

배후습지, 하도습지, 보습지, 하구습지의 토양호흡량은 각각 0.87 ± 0.96 $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$, 0.30 ± 0.36 $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$, 0.32 ± 0.20 $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$, 0.38 ± 0.26 $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 의 값을 기록하였으며, 배후습지의 값이 다른 습지에 비해 유의하게 높은 값을 나타내는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4). 또한, 토양호흡의 경우 계절적 차이가 나타났는데, 여름의 호흡이 0.81 ± 0.84 $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$, 봄-가을철의 호흡량은 각각 0.28 ± 0.20 $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$, 0.35 ± 0.40 $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 으로 여름이 봄-가을에 비해 높은 값을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 토양 호흡은 토양수분함량과 온도에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 토양호흡은 미생물 호흡과 식물의 뿌리호흡이 종합적으로 나타나는 결과이기 때문에, 생물학적 작용에 주요 요인이 되는 온도와 토양 수분 함량이 주요한 요인으로 작용하게 된다. 습지 토양의 경우, 물에 잠겨있는 토양이기 때문에 토양 수분 함량에 따른 산소 투과정도가 토양호흡에 중요한 역할을 담당하게 된다.

본 연구 대상지역의 토양호흡량과 토양 특성과의 상관관계를 분석해 본 결과, 모든 습지에서 온도와 유의한 상관관

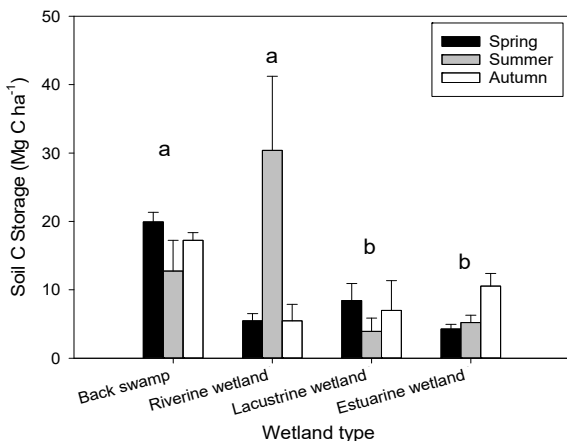


Fig. 3. Soil organic carbon content within a depth of 10cm in four different wetlands. Different letters (a and b) denote significant differences among wetland types.

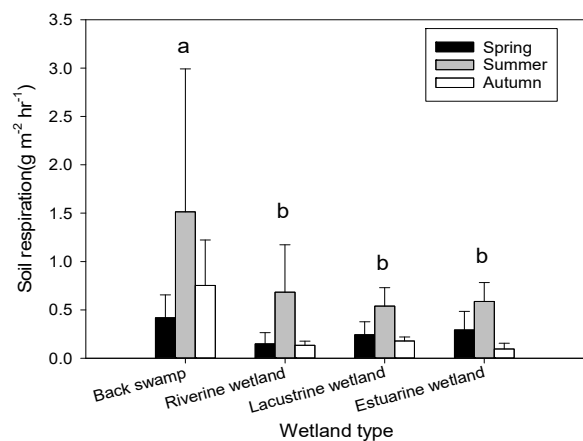


Fig. 4. The results of soil respiration in four different wetlands. Different letters (a and b) denote significant differences among wetland types.

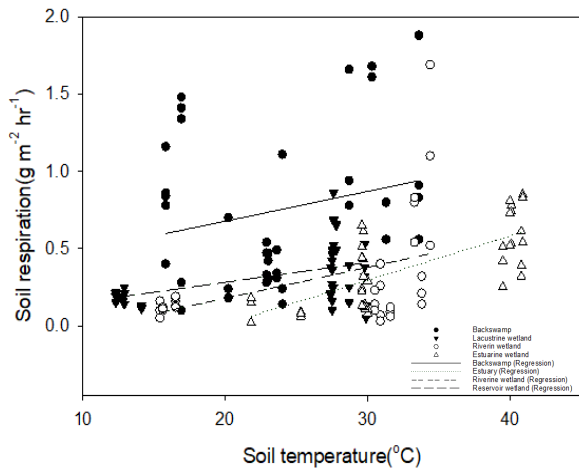


Fig. 5. Correlation between soil respiration and soil temperature.

계를 나타내고 있었다($p < 0.05$). 온도가 토양호흡에 중요한 요인이라는 결과는 이전에도 많은 연구들을 통해 알려져 왔다(Carey et al., 2016; Meyer et al., 2018; Swails et al., 2022; Wood et al., 2025). 본 연구에서도 모든 습지에서 온도와 유의한 상관관계를 나타낸 반면, 그 영향의 정도는 습지의 유형에 따라 차이가 있었다(Fig. 5). 배후습지($r=0.346$, $p=0.031$)의 경우에는 상관성이 낮게 나타난 반면, 하도습지($r=0.452$, $p=0.011$)와 보습지($r=0.451$, $p=0.002$)는 중간 정도의 상관관계를 나타내고 있었다. 마지막으로 하구습지의 경우에는 가장 큰 상관관계를 나타냈다($r=0.728$, $p < 0.001$). 하구습지의 경우, 타 습지에 비해 목본이 부재하고 초본류가 우점하고 있어 상대적으로 노출된 토양이 많다. 이러한 노출된 토양에서의 토양 호흡이 온도에 더 민감한 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 습지 중 가장 넓은 면적을 차지하고 있는 하천습지를 대상으로 4가지 유형의 습지에서 토양 탄소 저장량 및 토양호흡량을 측정하고, 다른 토양 특성들과의 상관관계를 살펴보았다. 그 결과, 토양탄소저장량은 배후습지와 하도습지에서 유의하게 높은 값을 기록하였다. 특히 배후습지의 경우, 토양탄소 뿐만 아니라, 토양수분함량, 총인, 총질소 역시 높게 나타나 가장 비옥한 환경을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 배후습지의 경우, 하천 범람 시에 하도 뒤쪽에 생성되는 습지로 상대적으로 안정적인 환경이 조성되어 있어 높은 탄소 및 영양염류의 농도가 나타난 것으로 보인다. 또한, 배후습지의 토성 역시 탄소나 영양염류가 결합하여 안정화 되기 쉬운 토성을 갖고 있어 이러한 경향이 나타난 것으로 보인다. 반면, 하도습지는 토양탄소 및 영양염류 등에서 낮은 값을 나타냈다. 이는 해수의 영향을 받는 습지의 특성을 반영한 것으로, 해수의 염분 등에 의해 낮은 토양 활성을 나타낸 것으로 보인다. 반면, 하도습지와 보습지는 토양 탄소 저장량, 영양 염류 등 많은 부분 비슷한

성향을 나타냈다. 두 습지 모두 하천에 영향을 많이 받는 습지이기 때문인 것으로 보인다.

토양 탄소 저장량과 토양 특성과의 상관관계 분석 결과, 4가지 유형의 습지 모두 총질소와 양의 상관관계를 나타내 질소의 영향을 많이 받는 것으로 확인되었다. 또한, 보습지와 하도습지는 총인과도 강한 상관관계를 나타낸 것을 알 수 있었다. 토양에서의 탄소 방출기작인 호흡량의 경우 배후습지가 가장 큰 값을 기록하였으며, 나머지 3가지 유형의 습지는 비슷한 양을 기록하였다. 배후습지의 경우 수분함량과 영양 염류들이 높게 나타나 미생물의 활성이 활발히 일어난 결과라 할 수 있겠다. 또한, 토양호흡은 여름철에 가장 높은 값을 나타냈으며, 봄과 가을철은 비슷한 수준의 값을 기록하였다. 이처럼 토양 호흡량은 온도와 양의 상관관계를 나타냈으나, 습지의 유형에 따라 그 경향은 다르게 나타났다. 배후습지의 경우에는 상관성이 낮게 나타난 반면, 하구습지의 경우에는 가장 큰 상관관계를 나타냈는데, 하구습지의 경우에는 토양의 식생 피도가 낮아 상대적으로 노출되어 있는 토양이 온도에 민감한 결과를 보였다.

다양한 습지에서 토양의 탄소 저장 및 방출을 살펴본 결과, 같은 유역에 위치한 습지라 하더라도 본류에 영향을 받는 정도에 따라 서로 다른 값을 기록하였다. 하천 습지의 경우, 우리나라 습지의 86%를 차지하고 있을 정도로 중요한 습지인 만큼, 하천습지의 다양한 유형에서의 탄소순환에 대한 연구가 진행되고, 그에 따른 탄소 저장 관리 및 증진 방안이 마련되어야 할 것으로 보인다.

사 사

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

References

- Adhikari, S., Bajracharaya, R. M., and Sitaula, B. K. (2009). "A review of carbon dynamics and sequestration in wetlands." *J Wetlands Ecol*, Vol. 2(1), pp. 42-46.
- Bai, J., Zhang, G., Zhao, Q., Lu, Q., Jia, J., Cui, B., and Liu, X. (2016). "Depth-distribution patterns and control of soil organic carbon in coastal salt marshes with different plant covers." *Sci Rep*, Vol. 6(1), pp. 34835.
- Carey, J. C., Frey, S. D., Smith, G. R., and Reichenberg, P. (2016). "Temperature response of soil respiration largely unaltered by experimental warming." *PNAS*, Vol. 113(45), pp. 12797-12802. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605365113>
- Carter, V., 1996, "Wetland hydrology, water quality, and associated functions, in National Water Summary on

- Wetland Resources”, *U.S. Geological Survey Water Supply Paper* Vol. 2425, pp. 35–48.
- Chen, Y. H., Mossa, J., and Ingh, K. K. (2020). “Floodplain response to varied flows in a large coastal plain river.” *Geomorphology*, Vol. 354, pp. 107035.
- Cotrufo, M. F., and Lavelle, J. M. (2022). “Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration.” *Adv Agron*, Vol. 172, pp.1–66.
- Curiel Yuste, J., Baldocchi, D. D., Gershenson, A., Goldstein, A., Misson, L., and Wong, S. (2007). “Microbial soil respiration and its dependency on carbon inputs, soil temperature and moisture.” *Global Change Biol*, Vol. 13(9), pp. 2018–2035.
- Długość, J., Piotrowska-Długość, A., and Breza-Boruta, B. (2024). “The effect of differences in soil water content on microbial and enzymatic properties across the soil profiles.” *Ecohydrol Hydrobiol* Vol. 24(3), pp. 547–556.
- Hassink, J. (1997). “The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles.” *Geoderma*, Vol. 79(1–4), pp. 47–74.
- Jackson, R. B., Lajtha, K., Crow, S. E., Hugelius, G., Kramer, M. G., and Piñeiro, G. (2017). “The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls.” *Annu Rev Ecol Evol Syst*, Vol. 48(1), pp. 419–445.
- Kaiser, K., and Guggenberger, G. (2000). “The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils.” *Soil Sci Soc Am J*, Vol. 64(2), pp. 430–435.
- Kim, J. H., Jeong, W. O., Shin, Y., and Jeong, B. (2022). “Evaluating Limiting nutrients through long-term data analyses and bioassay experiments in Cheonsu Bay and Taean Sea.” *J Korean Soc Mar Environ Saf*, Vol. 28(4), pp. 459–468.
- Kleber, M., Eusterhues, K., Keiluweit, M., Mikutta, C., Mikutta, R., and Nico, P. S. (2015). “Mineral–organic associations: formation, properties, and relevance in soil environments.” *Adv Agron*, Vol. 130, pp. 1–140.
- Kleber, M., Mikutta, R., Torn, M. S., and Jahn, R. (2005). “Poorly crystalline mineral phases protect organic matter in acid subsoil horizons.” *Biogeochemistry*, Vol. 70(3), pp. 277–296.
- Kögel-Knabner, I., Guggenberger, G., Kleber, M., Kandeler, E., Kalbitz, K., Scheu, S., ... and Leinweber, P. (2008). “Organo–mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry.” *J Plant Nutr Soil Sci*, Vol. 171(1), pp. 61–82.
- Li, H., Van den Bulcke, J., Wang, X., Gebremikael, M. T., Hagan, J., De Neve, S., and Sleutel, S. (2020). “Soil texture strongly controls exogenous organic matter mineralization indirectly via moisture upon progressive drying—Evidence from incubation experiments.” *Soil Biol Biochem*, Vol. 151, pp. 108051.
- Li, H., Van den Bulcke, J., Kibler, P., Mendoza, O., De Neve, S., and Sleutel, S. (2022). “Soil textural control on moisture distribution at the microscale and its effect on added particulate organic matter mineralization.” *Soil Biol Biochem*, Vol. 172, pp. 108777.
- Meyer, C. P., Welp, G., Amelung, W., and Flessa, H. (2018). “The temperature sensitivity (Q_{10}) of soil respiration: A global meta-analysis.” *Global Biogeochem Cycles*, Vol. 32(5), 738–753. <https://doi.org/10.1002/2017GB005644>
- Mischler, J. A., Taylor, P. G., and Townsend, A. R. (2014). “Nitrogen limitation of pond ecosystems on the plains of eastern Colorado.” *PLoS One*, Vol. 9(5), pp. e95757.
- Mitsch, W. J., and Mander, Ü. (2018). “Wetlands and carbon revisited.” *Ecol Eng*, Vol. 114, pp. 1–6.
- Mitsch, W. J., Bernal, B., Nahlik, A. M., Mander, Ü., Zhang, L., Anderson, C. J., ... and Brix, H. (2013). “Wetlands, carbon, and climate change.” *Landscape Ecol*, Vol. 28(4), pp. 583–597.
- Nahlik, A. M., and Fennessy, M. S. (2016). “Carbon storage in US wetlands.” *Nat Commun*, Vol. 7(1), pp. 13835.
- National Institute of Ecology. (2022) National Institute of Ecology_Inland wetland spatial data and attribute information. <https://www.data.go.kr/data/15086410/fileData.do>
- Oades, J. M. (1988). “The retention of organic matter in soils.” *Biogeochemistry*, Vol. 5(1), pp. 35–70.
- Palmer, M., and Ruhi, A. (2019). “Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: Implications for river restoration.” *Science*, Vol. 365(6459), pp. eaaw2087.
- Poulter, B., Fluet-Chouinard, E., Hugelius, G., Koven, C., Fatoyinbo, L., Page, S. E., ... and Wijedasa, L. S. (2021). “A review of global wetland carbon stocks and management challenges.” *Wetland Carbon Environ Manage*, pp. 1–20.
- Roh, Hee-Young. (2025). “Hydro-Vegetative Controls

- on Soil Carbon and Nutrient Dynamics in Riparian Wetlands.” *J Wetlands Res*, Vol. 27(3), pp. 298–305.
- Seybold, C. A., Mersie, W., Huang, J., and McNamee, C. (2002). “Soil redox, pH, temperature, and water-table patterns of a freshwater tidal wetland.” *Wetlands*, Vol. 22(1), pp. 149–158.
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., and Paustian, K. (2002). “Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils.” *Soil Biol Biochem*, Vol. 32(14), pp. 2099–2103
- Subke, J. A., Inglima, I., and Francesca, S. (2010). “On the ‘temperature sensitivity’ of soil respiration: Can we predict the temperature response?” *Soil Biol Biochem*, Vol. 42(6), 821–833. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.01.030>
- Swails, E. M., Smith, L. K., and ones, M. B. (2022). “Response of soil respiration to changes in soil temperature in drained and restored peatlands.” *Carbon Balance Manage*, Vol. 17, 12. <https://doi.org/10.1186/s13021-022-00219-5>
- Van Gestel, M., Merckx, R., and Vlassak, K. (1993). Microbial biomass and activity in soils with fluctuating water contents. In: *Soil Structure/Soil Biota Interrelationships* (pp. 617–626). Elsevier.
- Wharton, C. H. (1982). *The ecology of bottomland hardwood swamps of the Southeast: a community profile*. The Service.
- Wood, T. E., Smith, J., and Johnson, D. (2025). “Warming induces unexpectedly high soil respiration in a boreal forest.” *Nat Commun*, Vol. 16, pp. 62065. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-62065-6>
- Zelles, L., Adrian, P., Bai, Q. Y., Stepper, K., Adrian, M. V., Fischer, K., ... and Ziegler, A. (1991). “Microbial activity measured in soils stored under different temperature and humidity conditions.” *Soil Biol Biochem*, Vol. 23(10), pp. 955–962.
- Zhang, Z., Fluet-Chouinard, E., Jensen, K., McDonald, K., Hugelius, G., Gumbrecht, T., ... and Poulter, B. (2021). “Development of the global dataset of wetland area and dynamics for methane modeling (WAD2M).” *Earth Syst Sci Data*, Vol. 13(5), pp. 2001–2023.