

에디 공분산 기반의 플럭스 타워 관측자료를 이용한 두만강 유역 습지 생태계 CO₂ 흡수량 분석

Chen, Pengshen¹⁾ · Zhao, Shuqing¹⁾ · Cui, Guishan^{2),3),4)} · 이동근⁵⁾

¹⁾연변대학교 지리해양과학대학 학생 · ²⁾연변대학교 지리해양과학대학 교수 · ³⁾Tumen River Basin Wetland Ecosystem Field Scientific Research and Observation Station, Yanbian University, Yanji, 133002, China ·

⁴⁾Jilin Provincial International Joint Research Center of Tumen River Basin Wetland and Ecology, Yanbian University, Yanji, 133002, China · ⁵⁾서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부

Estimating carbon dioxide uptake in wetland ecosystems of Tumen River Basin using eddy covariance flux data

Chen, Pengshen¹⁾ · Zhao, Shuqing¹⁾ · Cui, Guishan^{2),3),4)} and Lee, Dongkun⁵⁾

¹⁾Master, College of Geography and Ocean Science, Yanbian Univ, Yanji, China,

²⁾Professor, College of Geography and Ocean Science, Yanbian Univ, Yanji, China,

³⁾Tumen River Basin Wetland Ecosystem Field Scientific Research and Observation Station, Yanbian University, Yanji, 133002, China,

⁴⁾Jilin Provincial International Joint Research Center of Tumen River Basin Wetland and Ecology, Yanbian University, Yanji, 133002, China,

⁵⁾Professor, Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University.

ABSTRACT

In the context of rapid temperature rise in mid-to-high latitude regions, cold region wetlands have become a hotspot for current wetland carbon cycle research due to their high sensitivity to climate change. Strengthening the monitoring of CO₂ fluxes in wetland ecosystems is of great practical significance for clarifying the carbon balance of wetlands and maintaining the ecological balance of wetland ecosystems in China's high latitude regions. In this study, the carbon flux (NEE, Net ecosystem exchange; GPP, Gross Primary Production; RECO, Ecosystem response) of Jingxin Wetland was

First author : Chen, Pengshen, College of Geography and Ocean Science, Yanbian University, Graduate student, Yanji 133002, China,

Tel : +86-139-9344-1233, E-mail : 2323557781@qq.com

Corresponding author : Cui, Guishan, College of Geography and Ocean Science, Yanbian University, Associate Professor, Yanji 133002, China,

Tel : +86-138-4338-1515, E-mail : cuiguishan@ybu.edu.cn

Received : 17 May, 2024. **Revised** : 21 June, 2024. **Accepted** : 3 June, 2024

monitored by eddy correlation method from August 2021 to March 2024. 2022-2023 shows CO₂ sinks, absorbing 349.4 g C·m⁻²·yr⁻¹ annually. The correlation analysis showed that Ta, VPD and PPFD were the main environmental factors affecting CO₂ flux in Jingxin wetland.

Key Words: *Wetland Ecosystem, Carbon Cycle, Net Ecosystem Exchange, JingXin Wetland*

I. 서론

습지 면적은 육상생태계의 약 4~6%에 불과하지만 탄소 축적량은 전지구 탄소 축적량의 약 15%를 차지함으로 매우 중요한 탄소 저장고 중의 하나이다 (김나영 등, 2018; Poulter et al., 2021). 최근 기후변화의 심각성을 인식하고 “탄소 중립” 목표 달성을 위한 정책을 추진하면서 습지의 탄소 흡수 기능에 대한 평가가 각광받고 있다(Cao et al., 2017). 탄소 흡수 기능은 주로 생태계 총 일차 생산량 (Gross Primary Production, GPP)에서 식물의 성장과 유지에 사용된 호흡량과 유기물을 분해하는 종속영양생물의 호흡량 (ecosystem respiration, Re)을 제한 순 생태계 교환량 (Net Ecosystem Exchange, NEE)으로 표현할 수 있다(Kong et al., 2022). 습지 생태계의 탄소 흡수 변화 메커니즘을 연구하기 위해서는 여러 가지 습지 유형의 탄소 흡수량의 특성을 파악하고 환경인자가 미치는 영향을 파악하는 것이 매우 중요하다(Miao et al., 2017).

최근 습지 생태계 탄소 흡수량에 대한 연구는 많이 이루어졌다 (Davidson et al., 2022). 대부분 연구는 주로 하구와 내륙 습지에 집중되었으며, 대기 및 토양 온도, 광합성 유효 복사량, 강수량 및 평균 수심 등 여러 요인이 습지 탄소 흡수량에 영향을 준다는 연구 결과를 얻었다(김형국 등, 2008; 박미옥 등, 2009; Zhang et al., 2022). 하지만 연구 방법에 따른 추정 결과는 차이가 크므로 생태계 탄소 흡수량에 대한 연구는 아직 불확실성이 크다(Duman and Schäfer, 2018). 또한 습지 생태계의 탄소 흡수 기능은 환경 요인에 따

라 다양한 변화를 보이며 기후 변화에 매우 민감하다(Meng et al., 2016). 습지는 분포 면적이 분산되어 있으므로 원격탐사 기반으로 된 탄소 흡수량 추정이 어렵다(Zhang et al., 2016).

에디 공분산 기법(Eddy Covariance Technique)은 대기와 생태계 간의 에너지와 물순환을 정량화하는 방법으로 탄소의 흐름과 시공간적인 변화를 분석할 수 있다. 또한이 기법은 넓은 지역에 대해 장기간에 걸쳐 플럭스를 적분하여 측정할 수 있는 장점이 있어 최근 많이 사용되고 있다 (Neubauer and Verhoeven, 2019). 이 기법은 생태학자와 미세 기상학자들 사이에서 널리 인정받고 있으며, 장기적인 수생태계 CO₂ 교환량을 측정하여 생태계의 광합성과 호흡에 대한 중요한 정보를 제공할 수 있다.

본 연구에서는 에디 공분산 기반의 플럭스 타워 관측자료를 활용하여 중국 두만강 하류 경신(敬信) 습지의 CO₂ 흡수 능력을 추정하고자 한다. 이와 동시에 이산화 탄소 흡수능력을 평가하기 위해서 GPP, Re, NEE 등 생태기능 인자의 시계열적 분석을 수행하였다. 또한 여러 가지 환경요인과의 분석을 통하여 경신 습지 생태계 탄소 흡수량의 특징을 파악하고 영향인자를 정량화하였다. 이는 습지 생태계의 탄소 흡수 능력 평가와 모델 개발에 검증 자료를 제공할 수 있으며 접경 지역의 환경생태 보호에 기초자료를 제공할 수 있다.

II. 연구 재료 및 방법

1. 연구대상지역

경신 습지는 중국 길림성 훈춘시 남부인 중국,

북한, 러시아 접경지대의 경신진(鎭)에 위치하고 있으며 두만강 하류에 속한다. 지리적 위치는 42°27'N~42°40'N, 130°25'E~130°39'E이다 (Figure 1). 경신 습지는 연평균기온이 약 5.6°C이고 강수량이 풍부한 기후 특성을 가지고 있다(Pu, 2022). 경신 습지는 생물 다양성이 풍부하고 갈대가 가장 많이 분포되어 있고 소택토 토양이 위주이고 부식질과 유기물이 풍부하다. 이는 습지의 생태계 구조와 기능을 보호하는데 중요한 역할을 한다(Guo, 2012; Piao, 2022).

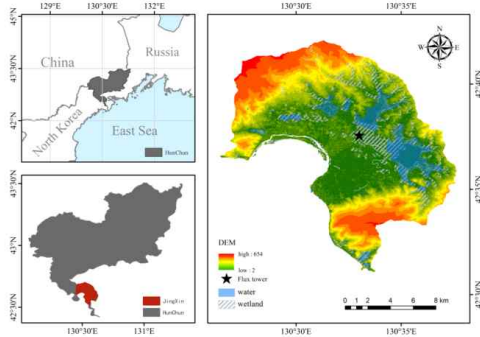


Figure 1. CO₂ flux observation location of Jingxin wetland

2. 에디 공분산 자료 처리

본 연구에서 사용된 에디 공분산 기반의 플럭스 타워 관측 자료는 CO₂ 분석기(LI-7500, LICOR, Lincoln, USA), 3차원 초음파 풍속계 (CSAT3, Campbell Scientific, Logan, USA)와 데이터 수집기(CR3000, Campbell Scientific, USA) 등으로 구성되어 있다. 환경요소 관측시스템을 이용하여 기온(Air Temperature, Ta, °C), 포화 수증기압 차 (Vapor Pressure Deficit, VPD, hPa), 광합성유효복사율(Photosynthetic Photon quanta Flux Density, PPFD, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 강수량(Precipitation, PPT, mm), 풍속(Wind Speed., WS, m s^{-1}) 등을 관측하였다. 데이터 수집기는 10Hz의 주파수로 원시 데이터를 기록한다. 또한 선형보간 방법, 호흡 방정식 (Lloyd & Taylor, 1994), 한계분포추출법(Marginal

Distribution Sampling; MDS) 등과 같은 전처리 방법을 이용하여 이상치 처리, 좌표 회전, 공백자료 채우기 등 처리를 수행하였다(Webb et al., 1980; Wilczak et al., 2001).

3. 상관 분석

본 연구에서는 Pearson 상관분석 방법을 이용하여 경신 습지 생태계의 2021년 8월부터 2024년 2월까지의 GPP, RECO, NEE 등 CO₂ 수지의 시계열적 분석을 수행하였다. 또한 생장기와 비생장기의 영향 인자들의 특성을 비교 분석하였고 환경 시간적도에 따른 변화 특성을 계산하였다. 분석은 일별 척도에서 연도별 척도에 따라 습지 생태계의 CO₂ 교환량과 각 기후인자 간의 관계를 계산하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 습지의 생태계의 NEE

연간 NEE의 변화를 살펴보면, 2022년과 2023년 사이의 GPP는 각각 $929.9 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, $1102.4 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 나타나고, Re는 각각 $438.7 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, $772.1 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 나타나고, NEE는 각각 $-341.6 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, $-375.2 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 나타냄으로써 경신 습지는 CO₂ 흡수원의 기능을 하고 있음을 시사한다.

2022년 6월에 경신 습지 생태계의 CO₂ 흡수 능력은 $139.6 \text{ g C m}^{-2} \text{ mon}^{-1}$ 로 가장 강력하다. 2022년의 습지 생장기의 월평균 NEE는 $-63.7 \text{ g C m}^{-2} \text{ mon}^{-1}$ 로 나타났다(Figure 2b). 생장기 동안 두만강 하류 경신 습지 순생태계의 대부분의 일일 누적 NEE 값은 대부분 음수를 나타냈고 일일 누적 최고 속도는 $-6.86 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 에 달했다. 또한 생장기 동안 습지 생태계가 전반적으로 CO₂ 흡수를 나타냈지만 4월 15일부터 5월 1일 사이에 습지 생태계는 짧은 CO₂ 배출을 보였고 최대 배출량은 $1.43 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이었다(Figure 2a).

일 NEE는 생장기월(4-9월) 기간에서 일출

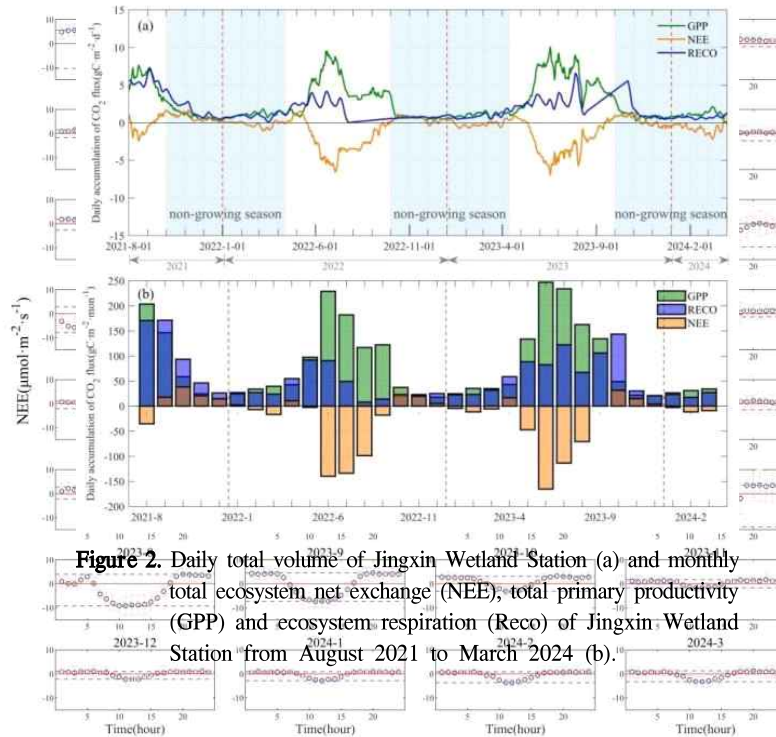


Figure 2. Daily total volume of Jingxin Wetland Station (a) and monthly total ecosystem net exchange (NEE), total primary productivity (GPP) and ecosystem respiration (Reco) of Jingxin Wetland Station from August 2021 to March 2024 (b).

Figure 3. Monthly average daily variation of NEE from August 2021 to March 2024

(04:30-06:30) 후 광합성 CO_2 고정량이 호흡작용 CO_2 배출량보다 많아진다(Figure 3). NEE는 2023년 6월에 일 최고 $16.91 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 를 기록하며 약 11:00-11:45 사이에 기록되었다. 이는 주로 생장기의 야간 광합성이 사라지기 때문에 밤에는 배출하고 낮에는 흡수되기 때문이다. 경신 습지의 비생장기에서의 일별 CO_2 플럭스 흡수원을 나타낸다. 월평균 NEE의 변화는 생장기 동안 'U'자형 변화 경향이 뚜렷하고 일일 변화 폭이 크며, 비생장기에는 월평균 NEE의 일일 변화 폭이 작다.

경신 습지의 연간 CO_2 고정률은 약 $349.4 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이며 습지의 평균 CO_2 고정 능력보다 훨씬 높은 것으로 나타났다(Mitsch and Mander, 2018). 경신 습지는 동해 연안에 위치해 있으므로 습지 CO_2 흡수량에 영향을 주는 환경요인의 차이로 인한 것으로 간주된다. 특히 NEE의 주야간 변화는

식생 유형과 기후 조건, 토양 습도 등의 영향을 많이 받는다(Chien et al., 2018; D'angelo et al., 2021).

2. 습지 NEE 변화의 영향요인

일별 척도에서 GPP와 Re는 PPFD, T_a , VPD와 양의 상관관계가 있으며, Re와 T_a 는 지수 관계($p < 0.001$; Figure 4)를 나타낸다. NEE는 PPFD, T_a , VPD와 음의 상관관계를 나타내고 WS와 약한 양의 상관관계를 나타낸다. CO_2 플럭스(GPP, Reco, NEE)와 환경 요인(T_a , VPD, WS, PPFD) 과의 상관관계는 NEE가 주로 일 단위 규모에서 T_a 와 높은 상관관계를 가진다. VPD와 PPFD의 영향이 그 뒤를 이어가고 Re는 주로 T_a 의 영향을 크게 받으므로 NEE는 주로 T_a 와 VPD 및 PPFD의 공동 영향을 받는다.

기온(T_a)과 경신 습지 생태계를 통한 CO_2 플

Table 1. Progressive regression of CO₂ exchange and environmental factors(S1/S2 respectively during the growing / non-growing season.Rainfall (PPT) was not significant in the multiple regression, so its sensitivity was not shown).

Stepwise regression equation	Model effect			Sensitivity			
	R2	P	Ta	PPFD	PPT	VPD	WS
NEE(s1)=-0.084Ta	0.46	<0.01	-0.67		-		-
NEE(s1)=-0.127Ta+0.55VPD	0.56	<0.01	-0.79			-0.46	
NEE (s2) =-0.056Ta+0.099VPD	0.23	<0.01	0.69		-	0.59	
GPP(s1)=0.19Ta		<0.01	0.89		-		-
GPP(s1)=0.13Ta+0.87*10-6PPFD	0.82	<0.01	0.60	0.36			
GPP(s1)=0.134Ta-0.14*10-6PPFD-0.69WS	0.84	<0.01	0.68	0.61		-0.31	
RECO(s1)=0.10Ta	0.42	<0.01			-		-
RECO(s1)=0.63Ta+0.56VPD	0.47	<0.05	0.38			0.36	
RECO(s2)=0.39VPD	0.75	<0.01		-	-	0.86	-

럭스의 성분별 상관성 분석과 선형 분석(Figure 4)을 수행한 결과 Ta와 NEE는 음의 상관관계를 보였고, Re와 Ta의 반응 곡선은 양의 상관관계가 있으며(P<0.01, 양측 테스트), GPP와 Ta의 관계는 지수 방정식으로 나타낼 수 있으며 상관관계가 매우 중요하다(P<0.01, 양측 테스트). NEE

는 온도가 증가함에 따라 생산성이 증가하는 경향을 보인다. VPD와 NEE는 명확한 선형적인 음의 상관관계를 보여주고 있으며 VPD의 증가는 습지의 CO₂ 흡수 능력의 증가를 제한한다.

생장기와 비생장기 일별 CO₂ 플럭스와 잠재적 환경 요인에 대한 다중 회귀 분석 결과, 성장

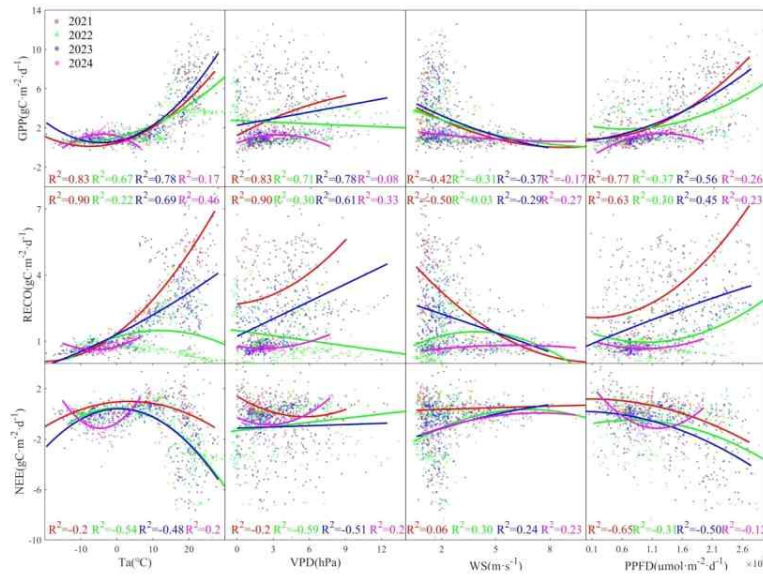


Figure 4. Relationship between daily carbon flux (GPP, RECO, NEE) and environmental factors (Ta, VPD, WS, PPFD). The fit line indicates significant regression at confidence of 0.05 (no significant relationship between rainfall and CO₂ and therefore not shown in the figure).

기 동안 Ta, PPFd 및 VPD가 생장기 동안 NEE의 전반적인 변화에 영향을 미치는 주요 환경 요인인 것으로 나타났다(Table 1). 그중 Ta와 PPFd는 생장기의 GPP에 공동으로 영향을 미치고 VPD는 온도와 함께 식생의 Reco에 영향을 미치며, 그중 Ta와 VPD는 NEE 변화의 56%를 설명할 수 있고, Ta와 PPFd는 GPP 변화의 82%를 설명할 수 있으며 Reco는 온도 변화로 42%의 변화를 설명할 수 있다. 따라서 Ta, VPD 및 PPFd는 생장기 CO₂ 교환의 변화를 공동으로 결정하는 반면, 비생장기 동안 NEE의 변화는 주로 Ta와 VPD의 영향을 받는다.

본 연구에서는 Ta와 VPD는 생장기 동안 CO₂ 플럭스의 변화를 영향 주는 주요한 요소로 간주되었다. 온도는 습지 CO₂ 플럭스에 영향을 미치는 중요한 인자 중의 하나로서 광합성보다 호흡 과정에서 더 큰 영향을 준다(Haaf et al., 2021). 경신 습지의 연구 결과에서도 호흡 과정에서 온도의 영향이 크게 나타났다. 또한 한랭지역의 습지는 저온 조건을 가지고 있기때문에 온도 및 열 조건은 식생 성장의 제한 요인으로 간주되며 CO₂ 플럭스를 조절하는 주요한 요소로 간주되기도 한다(Li et al., 2019).

VI. 결론

본 연구는 에디 공분산 관측 기법 기반의 CO₂ 교환량 분석을 통해 경신 습지의 CO₂ 고정능력과 배출량을 추정하였다. 2021년 8월부터 2024년 3월까지 경신 습지는 강력한 CO₂ 흡수 기능을 가지고 있으며 연평균 CO₂ 흡수 총량은 349.4g C m⁻² yr⁻¹로 나타났다. 30분 간격의 시간 척도에서는, CO₂ 교환량 일별 변화는 뚜렷한 시간적 차이를 보였다. 또한 생장기에서의 NEE는 식생의 광합성 변화에 따라 'U'자 곡선의 추세 변화 특징을 보이며 습지 생태계 생장기 중 황혼과 새벽 CO₂ 배출량이 주로 생장기 말에 집중되었다. 연구 지역의 습지는 CO₂ 고정 능력이 기타

습지 지역의 CO₂ 고정 능력보다 훨씬 높게 나타났다. 이는 주로 Ta와 VPD의 영향으로 인한 것으로 사료된다.

습지 생태계의 CO₂ 순환은 기타 생태계 유형에 비하여 수분에 대한 영향이 독특하다. 이는 습지는 장기간 물에 잠겨있기 때문이다. 따라서 보다 정확한 CO₂ 순환을 분석하고 영향요인을 정량화하기 위해서는 탄소-물 순환을 고려한 분석을 통하여 보다 더 정밀한 탄소 수지 추정이 필요하다. 따라서 향후 다양한 습지 유형에 대한 관측이 필요하며 과정 기반 모델과 위성영상기반 모델을 위한 정확도 향상에 중요한 기반이 될 것이다.

사사

본 연구는 National Natural Science Foundation of China (42276177)와 환경부 한국환경산업기술원의 생태계 기반 탄소흡수원 조성·관리 기술개발사업(RS-2023-00218245)의 지원을 받아 작성되었습니다.

References

- 김나영·송영근·이근호. 2018. 생태복원 습지의 조성 후 식생구조 변화. 한국환경복원기술학회지, 21(6).
- 김형국, 정진용, 구본학. 2010. 단양 및 주변 산지 습지의 판별 및 식생구조. 한국환경복원기술학회지, 13(1).
- 박미옥, 구본학, 김하나. 2009. 충청남도 내륙습지 특성 및 기능평가. 한국환경복원기술학회지, 5(2).
- Cao, S., Cao, G., Feng, Q., Han, G., Lin, Y., Yuan, J., Wu, F. and Cheng, S. 2017. Alpine wetland ecosystem carbon sink and its controls at the Qinghai Lake. *Environmental Earth Sciences*, 76.
- Chien, H., Zhong, Y.-Z., Yang, K.-H. and Cheng, H.-Y., 2018. Diurnal variability of CO₂ flux at

- coastal zone of Taiwan based on eddy covariance observation. *Continental Shelf Research*, 16(2): 27-38.
- D'angelo, B., Leroy, F., Guimbaud, C., Jacotot, A., Zocatelli, R., Gogo, S. and Laggoun-Défarage, F. 2021. Carbon Balance and Spatial Variability of CO₂ and CH₄ Fluxes in a Sphagnum-Dominated Peatland in a Temperate Climate. *Wetlands*, 41: 1-12.
- Davidson, S.J., Dazé, E., Byun, E., Hiler, D., Kangur, M., Talbot, J., Finkelstein, S.A. and Strack, M. 2022. The unrecognized importance of carbon stocks and fluxes from swamps in Canada and the USA. *Environmental Research Letters*, 17(5): 053003.
- Duman, T. and Schäfer, K.V.R., 2018. Partitioning net ecosystem carbon exchange of native and invasive plant communities by vegetation cover in an urban tidal wetland in the New Jersey Meadowlands (USA). *Ecological Engineering*, 114: 16-24.
- Falge, E., Baldocchi, D., Olson, R., Anthoni, P., Aubinet, M., Bernhofer, C., Burba, G., Ceulemans, R., Clement, R., Dolman, H. and Granier, A. 2001. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and forest meteorology*, 107(1): 43-69.
- Guo, Y. 2012. A study on the health assessment of wetland ecosystem in the lower reaches of the Tumen River. Master Thesis, Yanbian university.
- Haaf, D., Six, J. and Doetterl, S. 2021. Global patterns of geo-ecological controls on the response of soil respiration to warming. *Nature Climate Change*, 11(7): 623-627.
- Li, H., Zhu, J., Zhang, F., He, H., Yang, Y., Li, Y., Cao, G. and Zhou, H. 2019. Growth stage-dependant variability in water vapor and CO₂ exchanges over a humid alpine shrubland on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268: 55-62.
- Lloyd, J. and Taylor, J. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional ecology*: 315-323.
- Meng, L., Roulet, N., Zhuang, Q., Christensen, T.R. and Frohling, S. 2016. Focus on the impact of climate change on wetland ecosystems and carbon dynamics. *Environmental Research Letters*, 11(10): 100201.
- Miao, G., Noormets, A., Domec, J.C., Fuentes, M., Trettin, C.C., Sun, G., McNulty, S.G. and King, J.S. 2017. Hydrology and microtopography control carbon dynamics in wetlands: Implications in partitioning ecosystem respiration in a coastal plain forested wetland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247: 343-355.
- Mitsch, W.J. and Mander, Ü. 2018. Wetlands and carbon revisited. *Ecological engineering*, 114: 1-6.
- Neubauer, S.C. and Verhoeven, J.T.A. 2019. Wetland Effects on Global Climate: Mechanisms, Impacts, and Management Recommendations. In: S. An and J.T.A. Verhoeven (Editors), *Wetlands: Ecosystem Services, Restoration and Wise Use*. Springer International Publishing, Cham, pp. 39-62.
- Niu, B., He, Y., Zhang, X., Du, M., Shi, P., Sun, W. and Zhang, L. 2017. CO₂ Exchange in an Alpine Swamp Meadow on the Central Tibetan Plateau. *Wetlands*, 37(3): 525-543.
- Piao, X., 2022. Changes of soil methane flux in freshwater herbaceous swamp wetlands with different anthropogenic disturbance intensities.

- Master Thesis, Yanbian university.
- Poulter, B., Fluet Chouinard, E., Hugelius, G., Koven, C., Fatoyinbo, L. 2021. A Review of Global Wetland Carbon Stocks and Management Challenges, Wetland Carbon and Environmental Management. Geophysical Monograph Series, pp. 1-20.
- Pu, x., 2022. Study on the Changes of Soil Methane Flux in Freshwater Herbal Swamp Wetlands with Different Human Disturbance intensities. D Thesis.
- Rey-Sanchez, A., Morin, T., Stefanik, K., Wrighton, K. and Bohrer, G. 2018. Determining total emissions and environmental drivers of methane flux in a Lake Erie estuarine marsh. Ecological Engineering, 114: 7-15.
- Wei, D., Zhao, H., Huang, L., Qi, Y. and Wang, X. 2020. Feedbacks of Alpine Wetlands on the Tibetan Plateau to the Atmosphere. Wetlands, 40(4): 787-797.
- Zhang, Q., Sun, R., Jiang, G., Xu, Z. and Liu, S. 2016. Carbon and energy flux from a *Phragmites australis* wetland in Zhangye oasis-desert area, China. Agricultural and Forest Meteorology, 230-231: 45-57.
- Zhang, Y., Naafs, B.D.A., Huang, X., Song, Q., Xue, J., Wang, R., Zhao, M., Evershed, R.P., Pancost, R.D. and Xie S. 2022. Variations in wetland hydrology drive rapid changes in the microbial community, carbon metabolic activity, and greenhouse gas fluxes. Geochimica et Cosmochimica Acta, 317: 269-285.
- Zhu, Z., Sun, X., Wen, X., Zhou, Y., Tian, J. and Yuan, G. 2006. Study on the processing method of nighttime CO₂ eddy covariance flux data in ChinaFLUX. Science in China Series D: Earth Sciences, 49: 36-46.