

DOI: 10.5846/stxb202106291727

韩智献, 仝川, 刘白贵, 黄佳芳, 张林海. 干旱叠加海平面上升、氮负荷增加对河口潮汐沼泽生态系统净 CO₂ 交换的影响. 生态学报, 2022, 42(11): 4561-4571.

Han Z X, Tong C, Liu B G, Huang J F, Zhang L H. Effects of combination of drought and sea-level rise, nitrogen enrichment on net ecosystem exchange of CO₂ in an estuarine tidal marsh. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4561-4571.

干旱叠加海平面上升、氮负荷增加对河口潮汐沼泽生态系统净 CO₂ 交换的影响

韩智献^{1,2}, 仝川^{1,2,3,*}, 刘白贵^{1,2}, 黄佳芳^{1,2,3}, 张林海^{1,2,3}

1 湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350007

2 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

3 福建师范大学亚热带湿地研究中心, 福州 350007

摘要: 河口潮汐沼泽湿地是全球重要的蓝碳生态系统之一。海平面上升和氮负荷增加是入海河流河口湿地面临的两个主要环境问题。近年来, 干旱事件频发, 干旱及其与海平面上升、氮负荷增加的叠加将如何影响河口潮汐沼泽湿地生态系统净 CO₂ 交换, 目前还未见报道。2020 年夏秋, 福建沿海经历了数月严重的气象干旱, 这为揭示干旱对河口潮汐沼泽湿地生态系统净 CO₂ 交换量 (NEE) 和生态系统呼吸 (ER) 的影响提供了一个契机。分别于 2019 年 8—10 月 (正常天气) 和 2020 年 8—10 月 (干旱天气), 在闽江河口微咸水短叶荇菜沼泽湿地运用光合作用测定仪+箱法测定不同处理 (对照、模拟海平面上升、模拟氮负荷增加、模拟海平面上升+模拟氮负荷增加) 短叶荇菜湿地生态系统 NEE 和 ER, 以期揭示气象干旱与海平面上升、氮负荷增加的叠加对河口沼泽湿地生态系统净 CO₂ 交换的影响。与正常天气相比, 干旱天气下各处理 (包含对照) 的 NEE 均显著降低 ($P < 0.05$); 对照、海平面上升以及氮负荷增加处理样地的 ER 显著减少 ($P < 0.05$), 海平面上升+氮负荷增加处理 ER 显著增加 ($P < 0.05$)。NEE (负值) 与光合有效辐射 (PAR) 与呈显著负相关 ($P < 0.05$)。研究发现, 气象干旱降低了河口潮汐沼泽生态系统固碳规模, 且这种固碳规模的降低在叠加海平面上升或氮负荷增加的情景下仍将存在。

关键词: 干旱; 海平面上升; 氮负荷增加; 生态系统净 CO₂ 交换; 短叶荇菜沼泽湿地; 闽江河口

Effects of combination of drought and sea-level rise, nitrogen enrichment on net ecosystem exchange of CO₂ in an estuarine tidal marsh

HAN Zhixian^{1,2}, TONG Chuan^{1,2,3,*}, LIU Baigui^{1,2}, HUANG Jiafang^{1,2,3}, ZHANG Linhai^{1,2,3}

1 Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process, Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3 Research Centre of Wetlands in Subtropical Region, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Estuarine tidal marsh is one of the coastal blue carbon ecosystems in the world. Sea level rise and nitrogen enrichment are two major global environmental issues facing by estuarine wetlands. In recent years, meteorological drought events often occurred. The influences of drought, and combination of drought and sea-level rise, and nitrogen enrichment on net ecosystem exchange (NEE) of CO₂ of estuarine tidal marshes remain poorly studied. A novel approach using the weirs for *in-situ* manipulating sea level rise (including the increase of depth and duration of flooding) at relatively larger spatial scale was developed in the journal of Methods in Ecology & Evolution, however at present, the method has not been actually

基金项目: 福建省自然科学基金重点项目 (2019J02008); 福建省林业科技项目 (201916); 国家自然科学基金项目 (41877335)

收稿日期: 2021-06-29; 网络出版日期: 2022-02-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tongch@fjnu.edu.cn

used *in-situ* to study effects of sea level rise on carbon cycle in coastal tidal marsh ecosystem. In our study, we improved the weirs and used them to manipulate the sea level rise (SR) treatment *in-situ*, and meanwhile applied *in-situ* experimental manipulations of control, nitrogen enrichment (NE), and SR+NE in a tidal brackish marsh of *Cyperus malaccensis* in the Minjiang River estuary, southeastern China. In summer and autumn of 2020, the meteorological drought occurred in the coastal zone of Fujian Province, which provided an opportunity to determine the effects of drought, the combination of drought and simulated sea-level rise, nitrogen enrichment on the NEE and ecosystem respiration (ER). From August to October in 2019 and 2020, the NEE and ER were measured using transparent static chamber (or black cloth shading) + Licor-6800 method. Compared with 2019 (normal year), the NEE under each treatment (including control) was significantly reduced in 2020 (drought year), and the ER in the control, the SR, and the NE was also significantly decreased in 2020. NEE was significantly negatively correlated with the photosynthetically active radiation (PAR). The results indicate that drought event can reduce net CO₂ gain in estuarine tidal marshes, and this decrease still occurs under combination of drought and sea-level rise, nitrogen enrichment.

Key Words: drought; sea level rise; nitrogen enrichment; net ecosystem exchange of CO₂; *Cyperus malaccensis* marsh; Minjing River estuary

工业革命以来,温室气体二氧化碳(CO₂)排放不断增加,全球变暖逐渐加剧^[1]。随着全球气候变暖的加剧,全球不同尺度上热量和水分的重新分配,导致极端气候频发。尤其是 21 世纪以来,全球范围内的极端天气已对人类生存和发展构成巨大的威胁。极端气候是指在特定的时间或区域内,一个或多个气候变量引起的高于或低于界定值的极端事件^[2]。极端干旱是极端气候的主要表现形式之一,已越来越引起人们的关注^[3],其中常见的气象干旱最直接的表现是降水减少,蒸发旺盛,地表径流和下渗作用减弱,土壤孔隙水补给减少、地上植被的水分补给短缺^[4-5]。干旱对于植物生长、微生物活性、土壤理化性质都将产生巨大的影响,也对森林、湿地、农田生态系统的健康造成威胁^[6-7]。

在水分短缺的干旱区和半干旱地区,干旱对生态系统产生巨大的威胁,甚至导致整个生态系统功能的丧失^[8-9]。目前关于降水减少及干旱胁迫对湿地碳循环影响的研究主要集中在干旱、半干旱地区的湿地生态系统^[10-14],或在高寒湿地^[15],而关于降水对于河口潮汐沼泽湿地碳动态影响的报道极少^[16]。河口潮汐沼泽湿地是滨海湿地生态系统中一个重要类型,也是一个重要的蓝碳生态系统。水分状况是河口潮汐沼泽湿地水文环境中重要的一个部分,水分状况的变化对湿地植物乃至湿地生态系统的碳动态都造成影响^[17]。

海平面上升和氮负荷增加是入海河流河口面临的两个主要全球性环境问题。目前鲜见原位操作模拟海平面上升对于河口潮滩沼泽湿地生态系统净 CO₂ 交换量(net ecosystem exchange of CO₂, NEE of CO₂)和生态系统呼吸(ecosystem respiration, ER)影响的文献报道,韩智献等^[18]研究表明,海平面上升显著增加了冬季短叶茳芰湿地生态系统 NEE。此外,水淹变化对河口潮汐湿地 NEE 影响的结果也发现,潮汐过程增加了黄河三角洲滨海湿地生态系统白天 CO₂ 吸收,但对夜间的 CO₂ 释放的影响不明显,潮汐水淹是影响白天滨海湿地生态系统 CO₂ 净交换通量的主要环境因子^[19],或潮汐导致的淹水增加抑制了湿地生态系统呼吸^[20],然而,也有研究表明潮汐水淹增加了滨海沼泽生态系统 NEE^[21-22]。一般认为氮负荷增加可通过改善湿地植物营养状况,促进植物生物量增加进而促进 NEE,然而过高的氮输入可能对植物生长产生毒害,进而抑制 NEE^[23-24]。

近年来极端灾害天气频发已是不争的事实,揭示气象干旱与河口区面临的 2 个主要全球性环境问题(海平面上升、氮负荷增加)的叠加对于河口潮汐沼泽湿地生态系统净 CO₂ 交换产生的影响具有重要意义,然而目前还未见相关文献报道。2020 年夏季副热带高压带强势,福建沿海地区经历了持续的气象干旱天气。2020 年年初至 11 月 18 日,福州市降雨量 1186.8 mm,降雨量较常年(1431.3 mm)降低了约 17.1% (<https://www.tianqi.com/news/283118.html>),这为研究严重干旱天气对河口潮汐沼泽湿地生态系统 NEE 和 ER 的影响提供了一个契机。本研究对比分析了正常天气和干旱天气下的闽江河口短叶茳芰潮汐沼泽湿地在不同处理,

包括对照、模拟海平面上升、模拟氮负荷增加以及模拟海平面上升+模拟氮负荷增加处理下的 NEE 和 ER,以期揭示气象干旱与海平面上升、氮负荷增加的叠加对于河口潮汐沼泽湿地生态系统净 CO₂ 交换的影响,为亚热带河口区域的旱灾研究以及湿地碳循环研究提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究样地位于闽江河口鳝鱼滩湿地中部的中潮滩 (26° 0' 36"—26° 3' 42" N, 119° 34' 12"—119° 41' 40" E) (图 1)。闽江河口鳝鱼滩湿地年平均气温为 19.6℃,年降水量为 1350 mm,气候类型为典型的亚热带海洋性季风气候。闽江河口潮汐特征为典型的半日潮。鳝鱼滩湿地主要分布的土著种植物为短叶茳芏 (*Cyperus malaccensis*)、芦苇 (*Phragmites australis*) 和蔗草 (*Scirpus triquetra*)^[25]。本研究选取微咸水短叶茳芏沼泽湿地建立实验样地,样地内短叶茳芏长势良好且均匀分布。闽江河口短叶茳芏植株在 3 月初进入生长期,6—9 月为生长旺盛期,10 月以后生长趋于缓慢直至停止生长^[26–27]。

1.2 实验设计

本研究在选定的短叶茳芏湿地群落内设置一个 10 m×10 m 的大样地,并分为 3 个平行的 3 m×10 m 的亚样区,搭建木质栈桥便于到达和采样。每个亚样区均布设 4 个 1 m×1 m 的样地。对于以上 12 个样地随机布设以下 4 种处理:对照 (CK)、海平面上升 (SR)、氮负荷增加 (NE)、以及海平面上升+氮负荷增加 (SR+NE) (图 1 和图 2)。海平面上升模拟装置在 Cherry 等提出的原位操作海平面上升的围堰装置^[28]的基础上加以改进,通过单向进水管和浮球阀实现模拟海平面上升的效果,具体围堰装置设计见韩智献等^[18]实验设计。通过埋设水位计预实验表明:围堰内日均水淹时间增加 6 h,日均水淹高度增加 6.5 cm。

本研究对于模拟氮负荷增加、以及模拟海平面上升+氮负荷增加 2 个处理中的施氮水平均设定为 48 g m⁻¹ a⁻¹^[29–30]。2018 年 11 月份开始施氮,每半月施氮 1 次。本研究中施氮物为 NaNO₃ 和 NH₄Cl 混合溶液,其中 NO₃⁻:NH₄⁺ = 2:1,NaNO₃ 和 NH₄Cl 的施加量每月每次分别为 8.095 g 和 2.545 g 每次 NaNO₃ 和 NH₄Cl 用 2 L 样地附近潮沟水溶解,用喷壶将液体缓慢、均匀地喷洒于氮施加样地,再用喷壶将 2 L 潮沟水均匀地喷洒于氮添加处理的样地,以达到淋洗植物上残留施加物的目的。

1.3 CO₂ 浓度的测定及 NEE 和 ER 的计算

透明静态箱+红外气体分析仪相结合是测定湿地生态系统尺度 CO₂ 净交换的方法之一^[31–32]。在 2019 年的 8 月、9 月和 10 月以及 2020 年的 8 月、9 月和 10 月,每月选择 2 个连续晴朗的大潮日 (因 1 d 内无法对所有处理的各项指标测定完成,故在 2 个连续的测定日进行测定)。目前运用静态箱法测定滨海/河口潮滩沼泽

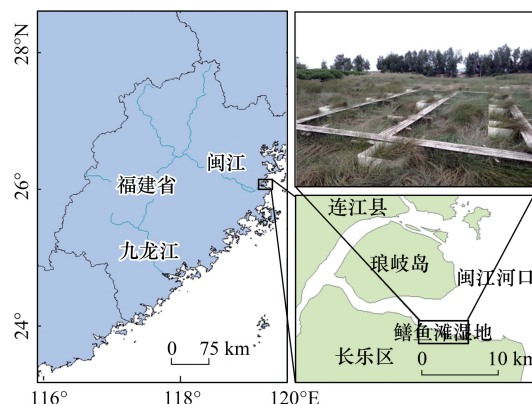


图 1 研究区域及实验样地位置

Fig.1 Location of the study area and the experiment site

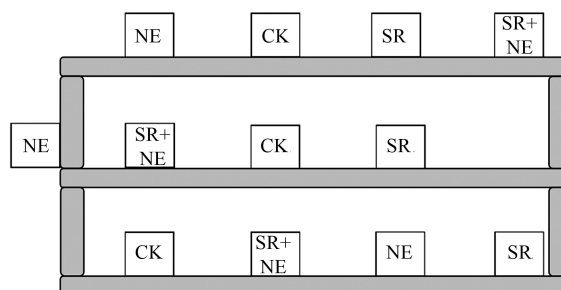


图 2 试验样地 4 个处理的布设

Fig.2 Layout of 4 treatments within the experiment site

CK: 对照 Control; SR: 海平面上升 Sea level rise; NE: 氮负荷增加 Nitrogen enrichment; SR+NE: 海平面上升+氮负荷增加 Sea level rise+Nitrogen enrichment

湿地碳通量的研究多在在退潮后(或涨潮前)地表出露阶段采集气样,而关于河口感潮沼泽湿地涨落潮过程平潮阶段的碳通量的报道极少,故本研究对于 12 个样地分别在涨潮前 1 h,平潮期以及落潮后 1 h 3 个时段,运用透明静态箱+Li—6800 光合作用测定系统仪(美国/Licor)的方法测定短叶荇菜湿地生态系统 NEE,然后,运用遮光布+透明静态箱+Li—6800 光合作用测定仪的方法测定短叶荇菜湿地生态系统 ER。

静态箱采用透明有机玻璃制作,分为底座、中箱和顶箱三个部分,各部分连接处的水槽可以通过加水保证静态箱的密封性。静态箱的底座长×宽×高为 35 cm × 35 cm × 30 cm,将底座插入地表下 20 cm,出露地表 10 cm,在底座一侧贴近地面处开孔,与地表齐平,非淹水阶段用橡胶塞密封保证箱内气密性,在淹水阶段打开橡胶塞保证底座内外潮水的正常交换。在箱内部装有 2 只小风扇和外接电源,实验阶段打开风扇混匀气体。在中箱距离顶部安装 2 个快速 PC 接头,用于连接静态箱内气体和 Li—6800 形成完整回路。为了透明静态箱的透光率达到最大,每次测定前均清洗静态箱,以保证静态箱处在最好的透明状态。

NEE 和 ER 根据静态箱内 CO₂浓度的变化率计算得出。NEE 负值表示表示生态系统净吸收 CO₂,该生态系统为大气的 CO₂的汇,NEE 正值表示表示生态系统净释放 CO₂,该生态系统为大气的 CO₂的源。在计算平潮期的 NEE 和 ER 时,箱内气体的顶空高度等于箱体总高度(1.6 m)减去采气样时静态箱内潮水水位高度,利用 Li—6800 光合作用测定仪测定 CO₂浓度 1 min 内即完成,故可以认为一个通量测定时段内静态箱内潮水水位高度无变化。根据计算的 NEE 和 ER 值推算出生态系统总初级生产力(GPP, gross primary productivity, $GPP = ER - NEE$)^[33]。

1.4 环境因子测定

研究样地的气象数据通过闽江河口湿地生态系统定位观测研究站(国家林草局)的气象自动观测系统(距离研究样地不到 30 m)获取,包括每日连续记录的大气温度以及连续不间断记录的降雨量。通过对 2019 年 6—10 月和 2020 年 6—10 月内的各次记录降雨量的汇总,计算得出各月的降雨总量。

在采样日同步测定大气温度、箱温、和光合有效辐射(PAR)。大气温度(静态箱内温度)用便携电子式温度计(Elitech/精创 RC—4HC,上海)测定,箱温测定配合温度探头使用。光合有效辐射(Photosynthetically active radiation, PAR)通过 Li—6800 光合作用系统实时记录。

1.5 地上生物量测定

2017 年 3 月至 2018 年 2 月我们逐月测量了闽江河口鳝鱼滩共 2786 株短叶荇菜植物的株高及地上部分干重,构建了短叶荇菜单株地上生物量(干重)的异速生长方程:

$$\ln y = 0.14 x^2 + 0.32x - 4.28 \quad R^2 = 0.9$$

式中,y:单株地上生物量干重(g);x:短叶荇菜株高(cm)的自然对数。

本研究中,在短叶荇菜湿地 NEE 和 ER 各测定日的地表出露阶段,分别随机选取各处理样地静态箱底座内 5 株短叶荇菜,代入异速生长方程得到平均单株生物量,并乘以底座内植株密度,得到单位面积短叶荇菜地上生物量估计值。

1.6 统计分析

数据处理采用 Microsoft Excel 2016、IBM SPSS Statistics 21、Origin 2018 进行数据的计算、分析以及制图。用 Excel 2016 进行 NEE、ER 的平均值、标准误差计算。利用重复测量方差分析(repeated measures analysis of variance/ANOVA),检验各处理之间 NEE、ER 和 GPP 在两个年份之间的差异显著性;利用单因素方差分析检验同一处理不同年份之间的差异性。柱状图、折线图、运用 Origin 2018 进行不同月份不同处理间的绘制。各环境因子和 NEE、ER 和 GPP 的相关关系研究采用 Origin 2018 做散点图、线性回归方程。

2 结果

2.1 环境因子的变化

研究样地 2019 年 8—10 月、2020 年 8—10 月的日均温的日动态变化如图 3 所示。2020 年 8—10 月平均

气温为 25.8℃,2019 年 8—10 月平均气温为 26.5℃。研究样地 2019 年 6—10 月、2020 年 6—10 月的月降雨量变化见图 4,2019 年 6—10 月研究样地降雨总量为 737 mm,2020 年同期降雨总量为 478.2 mm,与 2019 年的同时期比,2020 年降雨量减少 258.8 mm。除 2020 年 9 月比 2019 年同期降雨量增加了 222.4 mm,其它月份均明显减少。2020 年 9 月份降雨量高于 2019 年 9 月份,是因为 2020 年 9 月 9 号傍晚 18:00—20:00 一场约 150 mm 的暴雨所致。2019 年 8—10 月和 2020 年的 8—10 月气体采集阶段同步利用光合作用测定系统实时记录 PAR,每个采样日的涨潮前 1 h,平潮阶段、退潮后 1 h 的 PAR 见图 5。计算各测定日和各测定时刻的平均值,2020 年 8—10 月比 2019 年同期 PAR 降低 326.8 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

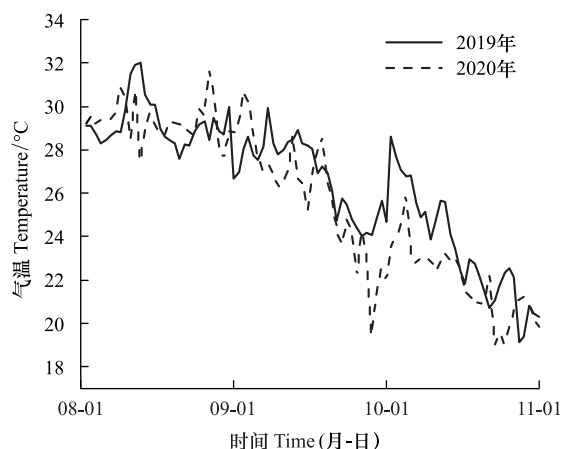


图 3 2019 年和 2020 年 8—10 月研究样地日气温比较

Fig.3 Comparison of daily air temperature of the study site during August–October, 2019 and 2020

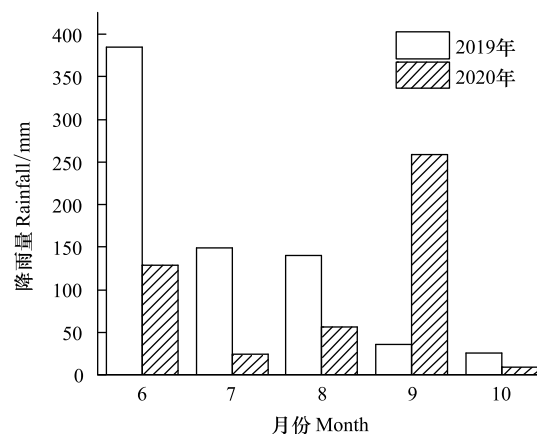


图 4 研究区 2019 年和 2020 年 6—10 月降雨总量对比

Fig.4 Comparison of rainfall in the study area from June to October in 2019 and 2020

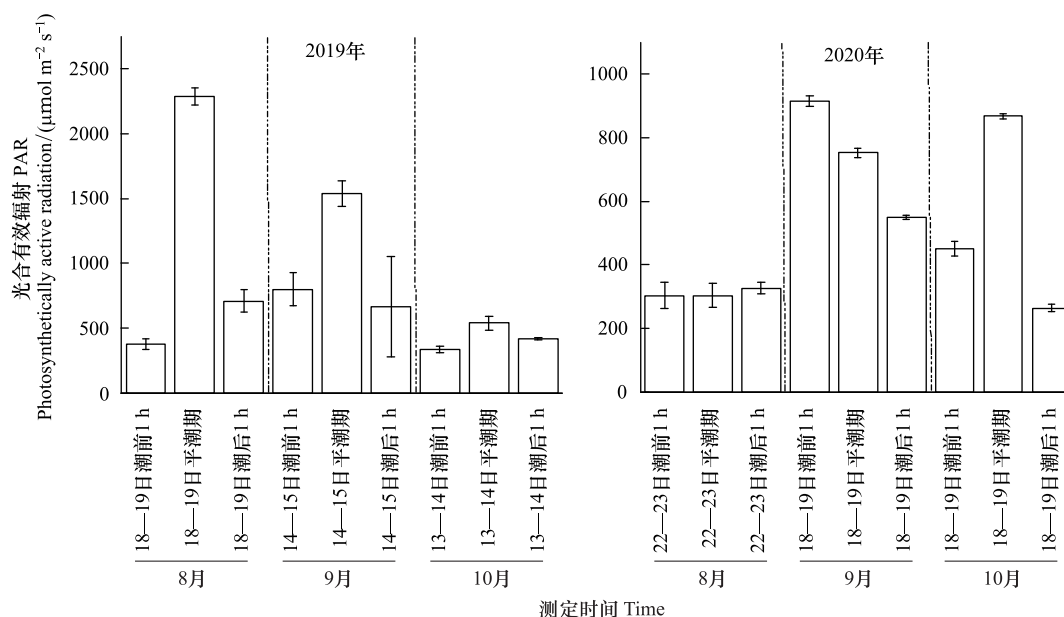


图 5 2019 年和 2020 年各采样日 3 个通量测定时刻研究样地 PAR 比较

Fig.5 Comparison of PAR of the study site at three measuring time on sampling dates in 2019 and 2020

PAR: Photosynthetically active radiation 光合有效辐射

2.2 地上生物量的比较

运用短叶茳芰地上生物量单株生物量(干重)估测模型估算 2019 年 8—10 月及 2020 年 8—10 月各处理样地的地上生物量。2019 年 8—10 月和 2020 年 8—10 月 4 个处理(CK、SR、NE、SR+NE)下的短叶茳芰湿地地上生物量月平均值见表 1。重复测量方差分析结果表明:与 2019 年 8—10 月地上生物量相比,2020 年 8—10 月对照处理样地地上生物量显著降低($P<0.05$),模拟海平面上升样地显著增加($P<0.05$),氮负荷增加样地显著降低($P<0.05$),交互作用处理不显著($P>0.05$)。为进一步探究地上生物量对 NEE、ER 和 GPP 的影响,对两个年份 8—10 月各处理下短叶茳芰湿地生态系统的地上生物量与 NEE、ER 和 GPP 做相关分析,结果表明:地上生物量与 NEE、ER 和 GPP 均达到极显著的正相关($P<0.001$)。

表 1 2019 年 8—10 月和 2020 年 8—10 月地上生物量的比较

Table 1 Comparison of above-ground biomass from August to October in 2019 and 2020

年份/处理 Year/Treatment	对照 CK	海平面上升 SR	氮负荷增加 NE	海平面上升+氮负荷增加 SR+NE
2019 年	1321.1±123.86	1346.46±46.32	1943.13±112.06	1653.45±129.05
2020 年	1083.46±52.5 *	1657.26±95.82 *	1495.69±32.51 *	1681.78 ±65.82

地上生物量单位 Aboveground biomass(g/m^2); * 表示同列不同年份地上生物量差异达到显著水平($P<0.05$)

2.3 NEE、ER 的比较

重复测量方差分析结果表明:在 2019 年 8—10 月,与对照相比,SR 显著增加了短叶茳芰湿地生态系统的 NEE($P<0.05$),NE 以及 SR+NE 也同样显著增加了短叶茳芰湿地生态系统的 NEE($P<0.01$)。与对照相比,SR 对短叶茳芰湿地的 ER 无显著影响($P>0.05$),NE 显著促进短叶茳芰湿地的 ER($P<0.05$);SR+NE 也达到了显著促进效果($P<0.01$)。在 2020 年 8—10 月,与对照相比,SR 同样显著增加了短叶茳芰湿地生态系统的 NEE($P<0.05$),NE 以及 SR+NE 也同样显著增加了短叶茳芰湿地生态系统的 NEE($P<0.05$)。与对照相比,SR 对短叶茳芰湿地的 ER 无显著影响($P>0.05$),NE 显著促进短叶茳芰湿地的 ER($P<0.05$);SR+NE 也达到了显著促进效果($P<0.01$)。

重复测定方差分析结果表明:与 2019 年 8—10 月相比,2020 年 8—10 月各处理组(CK、SR、NE、SR+ER)的 NEE 均显著下降($P<0.01$),下降的幅度分别为 23.4%、17.8%、33.9%和 39.2%(图 6)。与 2019 年 8—10 月相比,CK、SR、NE 组的 ER 也显著减少($P<0.05$),减少的幅度分别为 18.4%、13.4%和 11.4%,然而海平面上升+氮负荷增加组的 ER 却显著增加了 12.3%($P<0.05$)(图 6)。与 2019 年 8—10 月相比,2020 年 8—10 月各处理组(CK、SR、ER、SR+NE)的 GPP 均显著下降($P<0.05$),即分别减少了 22.1%、16.8%、27.8%和 28.1%(图 6)。

2.4 气温和 PAR 对 NEE、ER 的影响

气温与 NEE、ER 和 GPP 的散点图、线性拟合结果和线性回归方程见图 7。对照组的 NEE、ER 和 GPP 与气温无显著的相关关系($P>0.05$)。海平面上升组的 NEE 和 GPP 与气温分别呈显著的负相关和正相关($r^2=0.36, P<0.05$; $r^2=0.39, P<0.001$)。氮负荷增加组的 NEE 与气温呈显著的负相关($r^2=0.29, P<0.001$),氮负荷增加组的 ER 和 GPP 分别与气温呈显著的正相关($r^2=0.17, P<0.05$; $r^2=0.36, P<0.05$)。交互作用组的 NEE、ER 和 GPP 与气温无显著的相关关系($P>0.05$)。所有处理组(包括对照组)的 NEE(负值)与 PAR 呈极显著的负相关($P<0.001$)(图 8)。

3 讨论

在 2019 年 8—10 月(正常降雨),模拟海平面上升、氮负荷增加以及两者的结合均显著促进了短叶茳芰沼泽湿地的 NEE。氮负荷增加以及海平面上升+氮负荷增加均显著促进了 ER,模拟海平面上升处理对 ER 的影响并不显著。2020 年 8—10 月各处理的 NEE 和 ER 与 2019 年对比,都显著下降。海平面上升+氮负荷增加

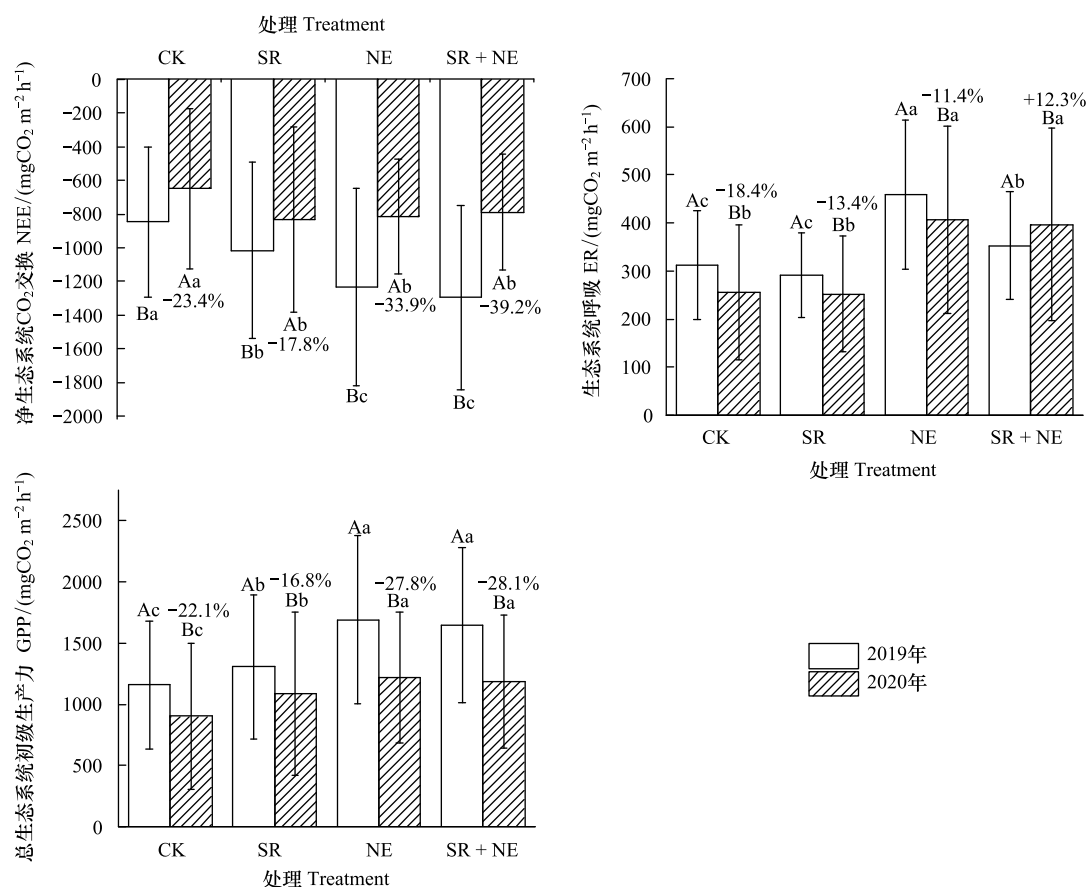


图6 短叶茳芰湿地 NEE、ER 和 GPP 的比较(2019 年 8—10 月与 2020 年 8—10 月)

Fig.6 Comparison of NEE, ER and GPP of the *C. malaccensis* marsh from August to October in 2019 and 2020

不同的大写字母代表同一处理不同年份具有显著差异性,不同的小写字母代表同一年份不同处理之间存在显著差异性;数字代表同一处理不同年份之间的变化值;NEE: net ecosystem exchange 生态系统净交换量;ER: ecosystem respiration 生态系统呼吸;GPP: gross primary productivity 总初级生产力

处理通过改善河口湿地土壤水分和营养盐条件,促进植物的生长,NEE 随之增加。模拟海平面上升情景下,ER 的响应没有 NEE 明显,ER 的变化未达到显著水平。

本研究结果表明:相对于正常年份,在干旱年份,不论是未经任何处理“原状的”短叶茳芰沼泽湿地(对照组),还是同时经历着海平面上升、或氮负荷增加、或海平面上升+氮负荷增加影响的短叶茳芰湿地的 NEE 均显著下降($P<0.05$),即气象干旱下河口微咸水短叶茳芰沼泽生态系统固碳能力明显下降。一些采用遮雨装置原位控制降水模拟极端干旱的研究已证明短期干旱显著降低半干旱草原生态系统、高原泥炭地生态系统、高原高寒草甸生态系统、森林生态系统的 NEE^[15,34—36]。Filipe 等^[37]运用涡度协方差通量塔的方法跟踪监测自然干旱天气事件对于森林生态系统净碳交换的影响,研究分表明:干旱显著降低了森林生态系统的净碳交换量。然而,目前鲜见干旱事件对于河口潮汐沼泽湿地生态系统净 CO₂ 交换的影响,本研究基于天然干旱事件的结果表明:数月的严重气象干旱降低了河口潮汐沼泽湿地的净生态系统 CO₂ 交换。

植物生长与生态系统 NEE 大小密切相关^[38—39]。对于湿地生态系统,植物对水分的需求较高,干旱缺水胁迫会对植物生长产生危害,在水分缺失的情景下,植物细胞内大量富集活性氧,活性氧过量造成营养物质在细胞膜的跨膜运输,引起营养物质的缺失^[40—41],并最终影响植物的生长。此外,干旱对于植物的生理胁迫还包括酶活性的降低以及植物气孔关闭,进而降低植物的光合速率^[10]。干旱胁迫造成的土壤含水量过低,植物生理活动受阻,导致植物光合能力以及呼吸强度下降,也是造成生态系统的净碳交换量下降的主要原因^[11]。

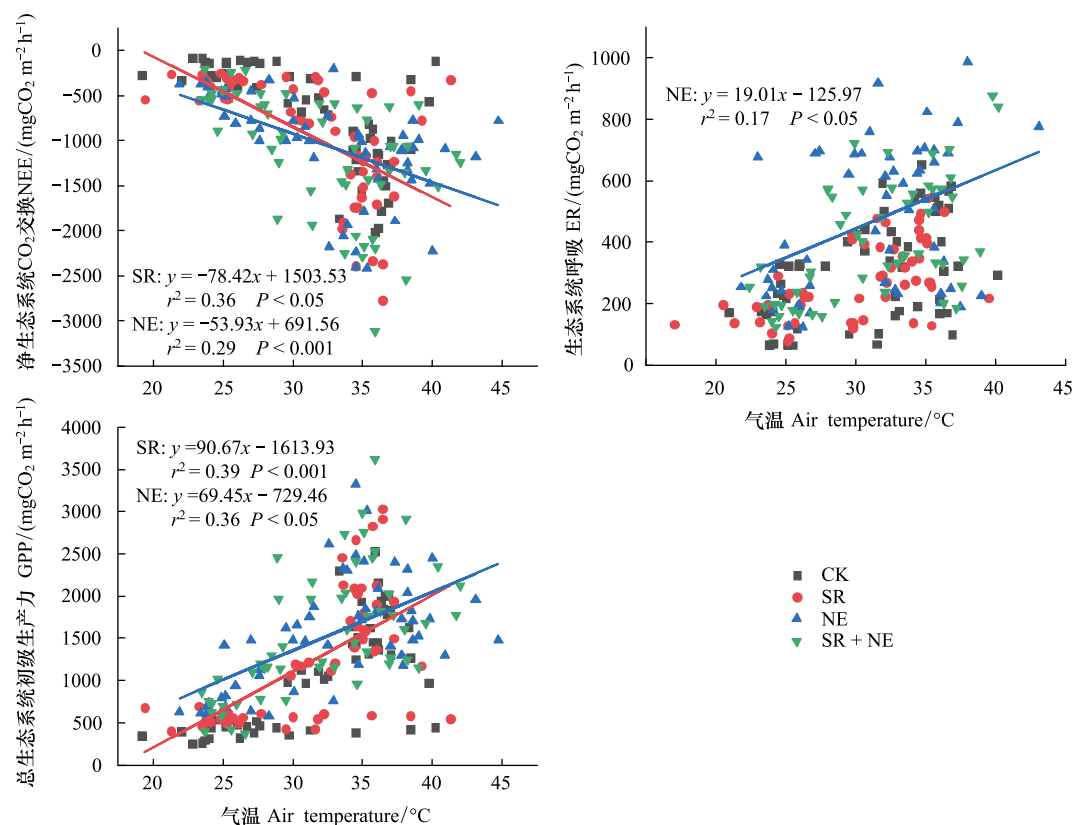


图7 气温与短叶荇菜湿地生态系统 NEE, ER, GPP 关系的散点和线性拟合关系 (n=54)

Fig.7 Scatter diagram and liner fitting relationship between air temperature and NEE, ER and GPP of the *C. malaccensis* marsh

本研究还发现,相对于对照组,海平面上升组在干旱胁迫下 NEE 降低幅度较小,而氮负荷增加组,以及两者的结合组的 NEE 在干旱胁迫下的下降幅度则相对剧烈(图6),这表明未来海平面上升可能将减缓气象干旱造成的河口/滨海沼泽湿地固碳功能下降的后果,而河口区域氮负荷增加以及氮负荷增加与海平面上升两者的结合将进一步加剧由于气象干旱造成的河口/滨海沼泽湿地生态系统固碳功能下降的后果。海平面上升带来的潮水水淹时间的增加可能缓解干旱胁迫^[42],我们推测这可能是本研究中模拟海平面上升组 NEE 降低的幅度有所减缓的主要原因,这也证实了水分对植物生长的关键作用。在正常气象年份(2019年),氮负荷增加,以及氮负荷增加与海平面上升两者的结合均较大幅度地提升了短叶荇菜沼泽湿地的 NEE,但是在气象干旱年份(2020年),氮负荷增加,以及氮负荷增加与海平面上升两者的结合并未造成短叶荇菜沼泽湿地的 NEE 的大幅度提升(图6)。此外,本研究中,氮负荷增加显著增加了短叶荇菜沼泽湿地的 ER,这也是造成氮负荷增加使得气象干旱造成的河口/滨海沼泽湿地生态系统固碳功能下降的幅度明显增加的原因之一。Wigand

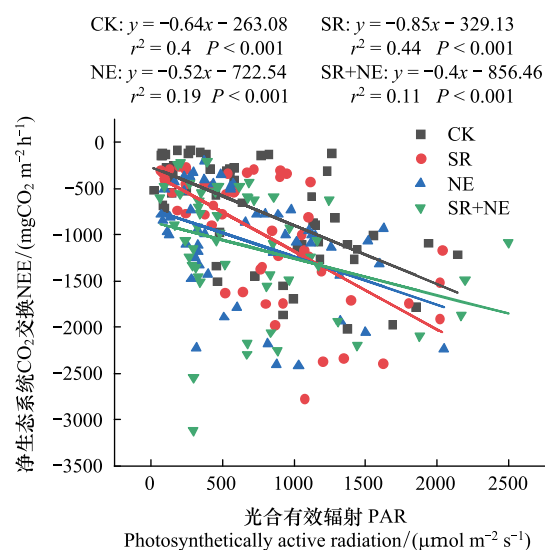


图8 PAR与短叶荇菜湿地生态系统 NEE 关系散点和线性拟合关系

Fig.8 Scatter diagram and liner fitting relationship between NEE and PAR of the *C. malaccensis* marsh

等^[13]研究表明,新英格兰盐沼湿地土壤呼吸速率随着流域氮负荷的增加而显著提高,Kivimäki 等^[12]通过原位模拟氮沉降试验研究表明,NH₄Cl 和 NaNO₃ 沉降增加了藓类泥炭沼泽(Sphagnum bog)的 ER,这些研究结果均与本研究的一致。

本研究中,相对于正常年份,在气象干旱年份,不论是未经任何处理“原状的”短叶荳蔻沼泽湿地(对照组),还是同时经历着海平面上升、或氮负荷增加影响的短叶荳蔻湿地的 ER 均显著降低($P<0.05$),即气象干旱下河口微咸水短叶荳蔻沼泽湿地生态系统呼吸强度明显下降。在干旱半干旱的草原地区,一些研究表明:气象干旱事件降低了草原生态系统的土壤呼吸^[43-44]。一些采用遮雨装置原位控制降水模拟极端干旱事件的研究发现短期干旱显著降低了半干旱草原生态系统和高原高寒草甸生态系统的 ER^[15,34-36]。

相对于对照组,气象干旱胁迫下的海平面上升组,以及氮负荷增加组的短叶荳蔻沼泽湿地 ER 下降的幅度变化不大(图 6),也就是说:不论未来是在海平面上升或者氮负荷增加的情景下,短叶荳蔻沼泽湿地 ER 对干旱天气的响应并没有 NEE 表现的明显。本研究中,即使在正常年份(2019 年),海平面上升处理也没有显著降低短叶荳蔻沼泽湿地的 ER,最终的结果就是与对照组比较,海平面上升使得气象干旱造成的河口/滨海沼泽湿地 ER 下降的幅度更小。

本研究中,与 2019 年 8—10 月相比,2020 年同期的对照组和氮负荷增加组的地上生物量均有所下降,这也与相对于正常年份,干旱年份对照组和氮负荷增加组的短叶荳蔻湿地 NEE 显著降低的结果相一致。PAR 是影响植物光合作用的主要因子^[45],本研究中,NEE(负值)与 PAR 呈极其显著的负相关($P<0.001$)(图 8),PAR 是影响湿地生态系统 NEE 和 ER 的一个重要环境因子。

4 结论

(1) 正常气象年份,海平面上升、氮负荷增加以及两者的结合均显著增加了河口潮汐沼泽湿地 NEE;海平面上升对 ER 无显著影响,氮负荷增加以及海平面上升和氮负荷增加的结合显著促进河口潮汐沼泽湿地 ER。

(2) 气象干旱降低了河口潮汐沼泽湿地 ER,然而,ER 降低的幅度在海平面上升以及氮负荷增加的情景下有所减缓;同时,气象干旱降低了河口潮汐沼泽湿地生态系统固碳规模,这种气象干旱造成的固碳能力下降现象在叠加海平面上升或氮负荷增加的情景下仍将存在。

(3) PAR 及地上生物量是影响河口潮滩沼泽湿地生态系统 NEE 的主要贡献者。

参考文献(References):

- [1] Larsen L, Moseman S, Santoro A, Hopfensperger K, Burgin A. A complex-systems approach to predicting effects of sea level rise and nitrogen loading on nitrogen cycling in coastal wetland ecosystems. In Kemp, P. F. (ed.), *Eco-DAS VIII Symposium Proceedings*. The American Society of Limnology and Oceanography Inc, Waco: 2010, 67-92.
- [2] Smith M D. The ecological role of climate extremes: current understanding and future prospects. *Journal of Ecology*, 2011, 99(3): 651-655.
- [3] Huang G, Li L, Su Y G, Li Y. Differential seasonal effects of water addition and nitrogen fertilization on microbial biomass and diversity in a temperate desert. *CATENA*, 2018, 161: 27-36.
- [4] Creamer C A, De Menezes A B, Krull E S, Sanderman J, Newton-Walters R, Farrell M. Microbial community structure mediates response of soil C decomposition to litter addition and warming. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80: 175-188.
- [5] Rajan N, Maas S J, Cui S. Extreme drought effects on carbon dynamics of a semiarid pasture. *Agronomy Journal*, 2013, 105(6): 1749-1760.
- [6] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, Frank D, Mahecha M D, Seneviratne S I, Zscheischler J, Beer C, Buchmann N, Frank D C, Papale D, Rammig A, Smith P, Thonicke K, Van Der Velde M, Vicca S, Walz A, Wattenbach M. Climate extremes and the carbon cycle. *Nature*, 2013, 500(7462): 287-295.
- [7] Jiang Z H, Song J, Li L, Chen W L, Wang Z F, Wang J. Extreme climate events in China: IPCC-AR4 model evaluation and projection. *Climatic Change*, 2012, 110(1/2): 385-401.
- [8] Piao S L, Zhang X P, Chen A P, Liu Q, Lian X, Wang X H, Peng S S, Wu X C. The impacts of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: a review. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(10): 1551-1563.
- [9] Sun W H, Zhao X N, Ling Q, Li H C, Gao X D. Revegetation modifies patterns of temporal soil respiration responses to extreme-drying-and-

- rewetting in a semiarid ecosystem. *Plant and Soil*, 2018, 433(1/2): 227-241.
- [10] Lafleur P M, Moore T R, Roulet N T, Frolking S. Ecosystem respiration in a cool temperate bog depends on peat temperature but not water table. *Ecosystems*, 2005, 8(6): 619-629.
- [11] Van Der Molen M K, Dolman A J, Ciais P, Eglin T, Gobron N, Law B E, Meir P, Peters W, Phillips O L, Reichstein M, Chen T, Dekker S C, Doubková M, Friedl M A, Jung M, Van Den Hurk B J J M, De Jeu R A M, Kruijt B, Ohta T, Rebel K T, Plummer S, Seneviratne S I, Sitch S, Teuling A J, Van Der Werf G R, Wang G. Drought and ecosystem carbon cycling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 765-773.
- [12] Kivimäki S K, Sheppard L J, Leith I D, Grace J. Long-term enhanced nitrogen deposition increases ecosystem respiration and carbon loss from a *Sphagnum* bog in the Scottish Borders. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, 90: 53-61.
- [13] Wigand C, Brennan P, Stolt M, Holt M, Ryba S. Soil respiration rates in coastal marshes subject to increasing watershed nitrogen loads in Southern New England, USA. *Wetlands*, 2009, 29(3): 952-963.
- [14] Yang Y, Liu B R, An S S. Ecological stoichiometry in leaves, roots, litters and soil among different plant communities in a desertified region of Northern China. *CATENA*, 2018, 166: 328-338.
- [15] 张远, 郝彦宾, 崔丽娟, 李伟, 张骁栋, 张曼胤, 李林峰, 杨思, 康晓明. 极端干旱对若尔盖高原泥炭地生态系统 CO₂ 通量的影响. *中国科学院大学学报*, 2017, 34(4): 462-470.
- [16] 李雪, 董杰, 李培广, 王晓杰, 韩广轩, 宋维民. 降雨量和降雨时间共同调控黄河三角洲典型盐沼湿地土壤碳矿化. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 581-590.
- [17] Han G X, Sun B Y, Chu X J, Xing Q H, Song W M, Xia J Y. Precipitation events reduce soil respiration in a coastal wetland based on four-year continuous field measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256-257: 292-303.
- [18] 韩智献, 仝川, 刘白贵, 黄佳芳, 唐晨. 模拟海平面上升和氮负荷增加对河口感潮沼泽湿地 CO₂ 垂直交换的影响. *环境科学学报*, 2021, 41(6): 2421-2429.
- [19] 贺文君, 韩广轩, 许延宁, 张希涛, 王安东, 车纯广, 孙宝玉, 张孝帅. 潮汐作用下干湿交替对黄河三角洲盐沼湿地净生态系统 CO₂ 交换的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 269-277.
- [20] Guo H Q, Noormets A, Zhao B, Chen J Q, Sun G, Gu Y J, Li B, Chen J K. Tidal effects on net ecosystem exchange of carbon in an estuarine wetland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(11): 1820-1828.
- [21] Heilman J L, Cobos D R, Heinsch F A, Campbell C S, McInnes K J. Tower-based conditional sampling for measuring ecosystem-scale carbon dioxide exchange in coastal wetlands. *Estuaries*, 1999, 22(3): 584-591.
- [22] Neubauer S C. Ecosystem responses of a tidal freshwater marsh experiencing saltwater intrusion and altered hydrology. *Estuaries and Coasts*, 2013, 36(3): 491-507.
- [23] Geoghegan E K, Caplan J S, Leech F N, Weber P E, Bauer C E, Mozdzer T J. Nitrogen enrichment alters carbon fluxes in a New England salt marsh. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2018, 4(11): 277-287.
- [24] Fang C, Li F M, Pei J Y, Ren J, Gong Y H, Yuan Z Q, Ke W B, Zheng Y, Bai X K, Ye J S. Impacts of warming and nitrogen addition on soil autotrophic and heterotrophic respiration in a semi-arid environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 248: 449-457.
- [25] 曾从盛, 仝川, 孙志高, 王维奇, 张林海, 黄佳芳. 闽江河口湿地生物地球化学元素循环研究进展. *亚热带资源与环境学报*, 2017, 12(3): 1-9.
- [26] 黄敏参. 咸草植物形态解剖及生理生态特性初步探讨[D]. 福州: 福建师范大学, 2008.
- [27] 郑彩红, 曾从盛, 陈志强, 林茂昌. 闽江河口区湿地景观格局演变研究. *湿地科学*, 2006, 4(1): 29-35.
- [28] Cherry J A, Ramseur Jr G S, Sparks E L, Cebrian J. Testing sea-level rise impacts in tidal wetlands: a novel *in situ* approach. *Methods in Ecology and Evolution*, 2015, 6(12): 1443-1451.
- [29] Alldred M, Liberti A, Baines S B. Impact of salinity and nutrients on salt marsh stability. *Ecosphere*, 2017, 8(11): e02010.
- [30] Deegan L A, Johnson D S, Warren R S, Peterson B J, Fleeger J W, Fagherazzi S, Wollheim W M. Coastal eutrophication as a driver of salt marsh loss. *Nature*, 2012, 490(7420): 388-392.
- [31] Bäckstrand K, Crill P M, Jackowicz-Korczyński M, Mastepanov M, Christensen T R, Bastviken D. Annual carbon gas budget for a subarctic peatland, Northern Sweden. *Biogeosciences*, 2010, 7(1): 95-108.
- [32] Järveoja J, Nilsson M B, Gažovič M, Crill P M, Peichl M. Partitioning of the net CO₂ exchange using an automated chamber system reveals plant phenology as key control of production and respiration fluxes in a boreal peatland. *Global Change Biology*, 2018, 24(8): 3436-3451.
- [33] 邢庆会, 韩广轩, 于君宝, 吴立新, 杨利琼, 毛培利, 王光美, 谢宝华. 黄河口潮间盐沼湿地生长季净生态系统 CO₂ 交换特征及其影响因素. *生态学报*, 2014, 34(17): 4966-4979.
- [34] Hao Y B, Zhang H, Biederman J A, Li L F, Cui X Y, Xue K, Du J Q, Wang Y F. Seasonal timing regulates extreme drought impacts on CO₂ and H₂O exchanges over semiarid steppes in Inner Mongolia, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 266: 153-166.

- [35] 张慧. 极端干旱和物种组成对内蒙古半干旱草原碳交换影响及机制的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2019.
- [36] 王子欣, 胡国铮, 水宏伟, 葛怡情, 韩玲, 高清竹, 干珠扎布, 旦久罗布. 不同时期干旱对青藏高原高寒草甸生态系统碳交换的影响. 草业学报, 2021, 30(4): 24-33.
- [37] Costa-e-Silva F, Correia A C, Piayda A, Dubbert M, Rebmann C, Cuntz M, Werner C, David J S, Pereira J S. Effects of an extremely dry winter on net ecosystem carbon exchange and tree phenology at a cork oak woodland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 204: 48-57.
- [38] Craft C, Clough J, Ehman J, Joye S, Park R, Pennings S, Guo H Y, Machmuller M. Forecasting the effects of accelerated sea-level rise on tidal marsh ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(2): 73-78.
- [39] 吴海东, 闫钟清, 张克柔, 王金枝, 康晓明. 高原泥炭地 CO₂通量对极端干旱的响应机理研究. 林业科学研究, 2020, 33(4): 92-101.
- [40] 马海泉, 范良敏, 姚丰平, 李华姿. 干旱胁迫对 4 种湿地植物生理特性的影响. 江西林业科技, 2013, (4): 8-10, 25-25.
- [41] 徐金英, 陈海梅, 王晓龙. 水深对湿地植物生长和繁殖影响研究进展. 湿地科学, 2016, 14(5): 725-732.
- [42] Schile L M, Callaway J C, Suding K N, Kelly N M. Can community structure track sea-level rise? Stress and competitive controls in tidal wetlands. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(4): 1276-1285.
- [43] Zheng P F, Wang D D, Yu X X, Jia G D, Liu Z Q, Wang Y S, Zhang Y E. Effects of drought and rainfall events on soil autotrophic respiration and heterotrophic respiration. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 308: 107267.
- [44] 李坤育. 降水增加和氮富集对温带典型草原土壤呼吸的影响[D]. 开封: 河南大学, 2020.
- [45] 初小静, 韩广轩, 邢庆会, 于君宝, 吴立新, 刘海防, 王光美, 毛培利. 阴天和晴天对黄河三角洲芦苇湿地净生态系统 CO₂交换的影响. 植物生态学报, 2015, 39(7): 661-673.