

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

李雪^{1,2,3} 董杰¹ 李培广^{2,3} 王晓杰^{2,3} 韩广轩^{2,3} 宋维民^{2,3*}

(¹聊城大学环境与规划学院, 山东聊城 252059; ²中国科学院烟台海岸带研究所, 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东烟台 264003; ³中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态实验站, 山东东营 257500)

摘要 研究降雨格局(如降雨量和降雨时间)对滨海盐沼湿地土壤碳矿化的影响,对于深入理解土壤碳的稳定性和积累机制具有重要意义。本研究选取远离海岸且不受潮汐影响的黄河三角洲原生盐地碱蓬盐沼湿地为对象,通过野外原状土柱的控制试验,分析土壤碳矿化(CO_2 和 CH_4 通量)在不同时期(干旱期和湿润期)对降雨事件的响应。结果表明:降雨时间和降雨量对土壤 CO_2 通量的影响存在交互作用。在干旱期,大降雨事件显著降低了土壤 CO_2 通量;而湿润期的降雨事件对土壤 CO_2 通量没有显著影响,这可能与盐沼湿地的水盐运移有关。降雨量、降雨时间及其交互作用均对土壤 CH_4 通量没有显著影响。降雨时间和降雨量对 CH_4/CO_2 比率均没有显著影响,但是相关分析表明随着土壤含水量和盐分的升高, CH_4/CO_2 比率呈升高趋势。随着降雨量的增加,土壤含水量和土壤盐分都显著增加,且两因素呈现显著的正相关关系。因此,未来该地区降雨体系改变将可能通过调控土壤水盐运移等条件对该滨海湿地土壤碳矿化和碳汇功能产生深远影响。

关键词 降雨体系; 气候变化; 黄河三角洲; 盐沼湿地; 碳汇; 土壤碳矿化

Co-regulation of rainfall amount and timing on soil carbon mineralization in a typical salt marsh of the Yellow River Delta, China. LI Xue^{1,2,3}, DONG Jie¹, LI Pei-guang^{2,3}, WANG Xiao-jie^{2,3}, HAN Guang-xuan^{2,3}, SONG Wei-min^{2,3*} (¹College of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, Shandong, China; ²CAS Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Restoration, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences (CAS), Yantai 264003, Shandong, China; ³Yellow River Delta Research Station of Coastal Wetland Ecology, Chinese Academy of Sciences, Dongying 257500, Shandong, China).

Abstract: Studying the effects of rainfall regimes such as rainfall amount and timing on soil carbon mineralization is of great importance for our understanding the mechanisms underlying the stability and accumulation of soil carbon in coastal salt marshes. In this study, we examined the responses of soil carbon mineralization (CO_2 and CH_4 fluxes) from undisturbed soil columns to rainfall events in different seasons (dry and wet seasons) with filed experiments in a primary *Suaeda salsa* region in the Yellow River Delta salt-marsh wetland, which is far away from the coast and not affected by tides. The results showed that rainfall amount and timing had a significant interaction in affecting soil CO_2 flux rates. During the dry season, large rainfall events significantly reduced soil CO_2 flux rates but had no significant effect in the wet season, which might be closely related to the significant increase in soil water content and salinity. Rainfall amount, rainfall timing and their interactions had no significant effect on soil CH_4 efflux rates. Rainfall timing and rainfall amount did not affect CH_4/CO_2 . CH_4/CO_2 increased with increasing soil water content and salinity. Soil water content and soil salinity showed similar increases to increasing rainfall amount. Our results suggested that the

本文由国家自然科学基金项目(41706097)、国家自然科学基金委员会-山东联合基金项目(U1906220)和中国科学院“十三五”信息化建设专项(XXH13506)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41706097), the NSFC-Shandong Union Project (U1906220), and the 13th Five-year Informatization Plan of Chinese Academy of Sciences (XXH13506).

2020-06-02 Received, 2020-10-28 Accepted. Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wmsong@yic.ac.cn

changing rainfall regime under climate change in the future would have a great impact on soil carbon mineralization and carbon sink function by regulating soil water and salt migration in this region.

Key words: rainfall regime; climate change; the Yellow River Delta; salt marsh; carbon sink; soil carbon mineralization.

在全球气候变化研究中,区域碳收支(源-汇)变化已经成为全球碳循环研究的核心内容和科学热点^[1-2]。土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,全球约有 1500 Pg(1 Pg = 10¹⁵ g) 碳以土壤有机碳的形式贮存在地球陆地表层^[3],在全球碳循环中发挥着至关重要的作用。土壤碳库的微小变化都会极大地调节生态系统碳收支平衡^[4]。因此,理解生态系统土壤碳矿化状况及影响机制对于正确评估生态系统的碳收支十分重要。

滨海盐沼湿地是全球“蓝色碳汇”的重要组成部分,由于具有较高的初级生产力和较慢的有机质分解速率,它具有较快的碳积累速率^[5]。滨海盐沼湿地地下水位浅,易受淡水(降雨)和咸水(地下水)交互作用的影响^[6]。在气候变化背景下,降雨格局特别是降雨量变化引起的滨海盐沼湿地生态水文环境尤其是土壤盐分“表聚”与“淋洗”的交替变化将会改变生态系统碳交换过程,进而造成滨海盐沼湿地土壤有机碳积累和“碳汇”角色的不稳定性^[7]。因此,量化土壤碳矿化对降雨事件的响应对于准确理解滨海盐沼湿地生态系统碳平衡至关重要。

在陆地生态系统中,研究者对降雨事件如何影响土壤碳矿化开展了大量研究^[8-9]。在土壤干旱条件下,随着降雨量的增加,土壤碳矿化速率会逐渐升高^[10];而在过度湿润或饱和土壤条件下,降雨事件对土壤碳矿化的影响较弱甚至是副作用^[11]。此外,不同降雨时间对土壤碳矿化具有调节作用。例如,Huang 等^[12]在干旱生态系统的研究发现,生长季节的增雨事件能显著提高土壤微生物活性和碳矿化能力,而在非生长季节效应不显著。但在滨海湿地生态系统中,关于土壤碳矿化对降雨事件响应的研究却鲜有报道,且深入的机理性分析也较为匮乏。除此之外,作为土壤有机碳厌氧环境下的矿化产物,滨海湿地的 CH₄排放量是全球 CH₄排放总量的重要组分,降雨事件引起的水文环境改变将会对 CH₄的产生和排放机制产生影响并逐渐成为当前的一个研究重点^[13]。因此,准确量化土壤碳矿化(CO₂及 CH₄通量)对降雨事件的响应对于准确理解滨海盐沼湿地的“碳汇”功能具有重要的理论意义,同时也为预测和模拟未来气候变化特别是降雨量变化背景下滨海

盐沼湿地碳循环提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省东营市垦利区中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站(37°45′50″N, 118°59′24″E),该地属暖温带半湿润大陆性季风气候区,四季分明,雨热同期。地势平坦,土壤质地以轻壤土和中壤土为主,土壤类型以潮土和盐碱土为主。该地区植被的形成和分布同时受土壤水分和盐分两个环境因子的共同作用^[14],主要的植被为盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、芦苇(*Phragmites australis*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)和白茅(*Imperata cylindrica*)。该研究区多年平均气温为 12.9 °C,最低和最高月均温分别为 1 月的 -2.8 °C 和 7 月的 26.7 °C,多年平均年降水量为 556.1 mm,其中 70% 降水集中于生长季,年蒸发量为 1962 mm^[15]。2019 年年平均气温为 14.0 °C,最高日均温为 31.3 °C,最低日均温为 -6.0 °C;年降雨量为 487.5 mm,其中 7—9 月的降雨量为 380.8 mm,约占全年的 78%(图 1)。根据降雨量和土壤含水量波动情况,可将黄河三角洲湿地生长季(4—10 月)分为 2 个阶段,即干旱期和湿润期,其中湿润期包含一段时间的淹水期。

1.2 试验设计

选取远离海岸且不受潮汐影响的黄河三角洲原生盐地碱蓬盐沼湿地为研究对象,该湿地受淡水(降雨)和咸水(地下水)交互作用影响明显,并呈现

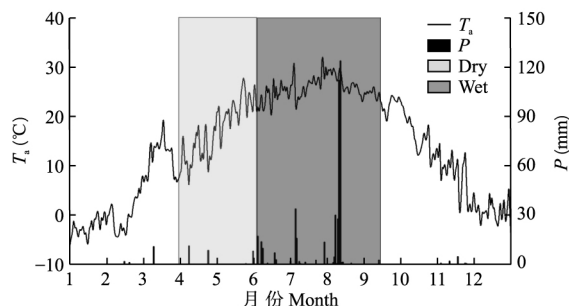


图 1 2019 年气温和降雨量动态

Fig.1 Daily air temperature and precipitation in 2019.

T_a: 气温 Air temperature; P: 降雨量 Precipitation. Dry: 干旱期 Dry season; Wet: 湿润期 Wet season. 下同 The same below.

出受降雨主导的典型水盐季节性变化格局。在干旱期(2019年4月22日—5月10日)和湿润期(2019年7月14日—8月1日)分别采集原状土进行试验。具体操作为:在4月22日和7月14日分别选取地势平坦、植被稀疏的碱蓬湿地,放置高50 cm、直径50 cm的PEC管,用机械将PEC管缓慢砸入土壤中,PEC管采用透水性帆布包裹底部以保证土壤水分的运移,然后运至透光良好的遮雨棚中,剔除地上植株和表层土壤根系,PEC管外包裹反光布避免管外壁的吸热干扰。为减弱人为活动对土壤的干扰和影响,土柱静止一周后开始降雨处理。

分析近10年的降雨数据发现,降雨量为0~20 mm的降雨事件占到总降雨事件的83.3%,其中,5 mm以下降雨事件占59.1%,5~10 mm降雨事件占11.8%,10~20 mm降雨事件占12.3%。此外,数据分析显示,干旱期和湿润期不同降雨事件的比例略有不同,5 mm以下、5~10 mm和10~20 mm降雨事件比例在干旱期分别为54.8%、15.9%和17.5%,而在湿润期则分别为46.5%、9.3%和15.5%。为了统一不同季节的降雨量处理,在干旱期与湿润期均设置4个相同的降雨事件,即0(CK)、5、10、20 mm,每处理5个重复,共20个土柱。由于干旱期和湿润期无法收集足够的降雨,因此本试验利用蒸馏水进行人工模拟降雨,为防止降雨时蒸发带来干扰,选择在降雨当天的黎明时间进行人工降雨喷洒。

1.3 土壤CO₂及CH₄通量测量

在降雨处理前2 d,在每个土柱中间安放PVC环(高10 cm,直径20 cm,插入土深约6.5 cm),采用LGR便携式温室气体分析仪(UGGA, Los Gatos Research Inc., San Jose, USA)进行土壤CO₂及CH₄通量测定。在降雨量处理前一日和降雨量处理后每2 d测量一次,共测定7次。

1.4 土壤理化性质测定

试验采用元素分析仪(vario MACRO cube, Elementar Analysensysteme GmbH, GER)测定土壤总碳和总氮,采用环刀法测定表层土壤孔隙度。在测定土壤CO₂和CH₄通量的同时,采用便携式土壤水分

测量仪(ML3-Kit, Delta-T Inc., UK)测定6 cm处土壤体积含水量,采用土壤电导率仪(Spectrum Technologies Inc., Phoenix, AZ, USA)测定6 cm处土壤盐分和温度(表1)。土壤电导率(EC)可反映土壤中可溶性盐含量的高低,本研究采用电导率表示土壤盐分。

1.5 数据处理

采用双因素方差分析(two-way ANOVA)检测降雨时间、降雨量以及它们潜在的交互作用对各指标的影响。如果降雨量和降雨时间存在交互作用,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同降雨时间下降雨量处理对各指标的影响($\alpha=0.05$)。采用线性回归分析土壤水分、盐分和温度与土壤CO₂和CH₄通量的相关关系。所有数据分析均基于统计软件SPSS 22.0完成,相关图形均基于SigmaPlot 12.5软件完成,图表中数据为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 土壤环境因子的响应特征

统计分析表明,降雨时间和降雨量处理对表层土壤含水量的影响存在显著的交互作用,同时对表层土壤盐分也具有显著的交互作用,但对表层土壤温度的交互影响不显著(表2)。在干旱期,降雨处理前的土壤含水量和盐度分别为38.2%和11.83 mS·cm⁻¹(表1)。由图2可知,降雨处理后,土壤含水量与土壤盐分都迅速升高,且随降雨量增加响应幅度增大,之后随着时间延长响应幅度都有逐渐降低的变化趋势;降雨处理前的土壤温度为16.2℃,降雨量处理下的表层土壤温度与CK变化趋势一致。在湿润期,降雨量处理前的土壤含水量和盐度均显著高于干旱期。降雨处理后土壤含水量与土壤盐分也迅速升高,但响应幅度较干旱期小;降雨处理前的土壤温度均显著高于干旱期,降雨处理后表层土壤温度在试验前期阶段有降低趋势,但随后的变化趋势与CK一致。

在干旱期,降雨处理显著提高了试验期间的土

表1 研究样地土壤基本特征

Table 1 Soil basic characteristics of research site

时期 Season	SWC (%)	T _s (℃)	EC (mS·cm ⁻¹)	TN (mg·g ⁻¹)	TC (mg·g ⁻¹)	SP (%)
干旱期 Dry season	38.2±0.1	16.19±0.11	11.83±0.28	0.24±0.01	11.69±0.09	41.0±0.03
湿润期 Wet season	46.7±0.1	31.44±0.11	14.88±0.37	0.24±0.01	11.71±0.10	39.0±0.04

SWC: 土壤含水量 Soil water content; T_s: 土壤温度 Soil temperature; EC: 土壤电导率 Soil electrical conductivity; TN: 土壤总氮 Soil total nitrogen; TC: 土壤总碳 Soil total carbon; SP: 土壤孔隙度 Soil porosity. 下同 The same below.

表 2 降雨时间和降雨量对土壤环境因子和土壤碳矿化的双因素方差分析

Table 2 Results of two-way ANOVA on the effects of rainfall timing and rainfall amount on soil environmental factors and soil carbon mineralization

项目 Item		SWC	T_s	EC	CO ₂ flux	CH ₄ flux	CH ₄ /CO ₂
降雨时间	<i>P</i>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.82	0.43
Rainfall timing	<i>F</i>	242.03	1296.73	40.95	24.77	0.05	0.63
降雨量	<i>P</i>	<0.01	0.45	<0.01	<0.01	0.50	0.07
Rainfall amount	<i>F</i>	104.09	0.89	17.82	14.53	0.81	2.64
降雨时间×降雨量	<i>P</i>	<0.01	0.28	0.01	0.03	0.83	0.94
Rainfall timing × rainfall amount	<i>F</i>	59.48	1.33	5.00	3.24	0.29	0.13

CO₂ flux: 土壤 CO₂ 通量 Soil CO₂ flux; CH₄ flux: 土壤 CH₄ 通量 Soil CH₄ flux; CH₄/CO₂: 土壤 CH₄ 与 CO₂ 通量比率 Soil CH₄ flux to CO₂ flux ratio. 下同 The same below.

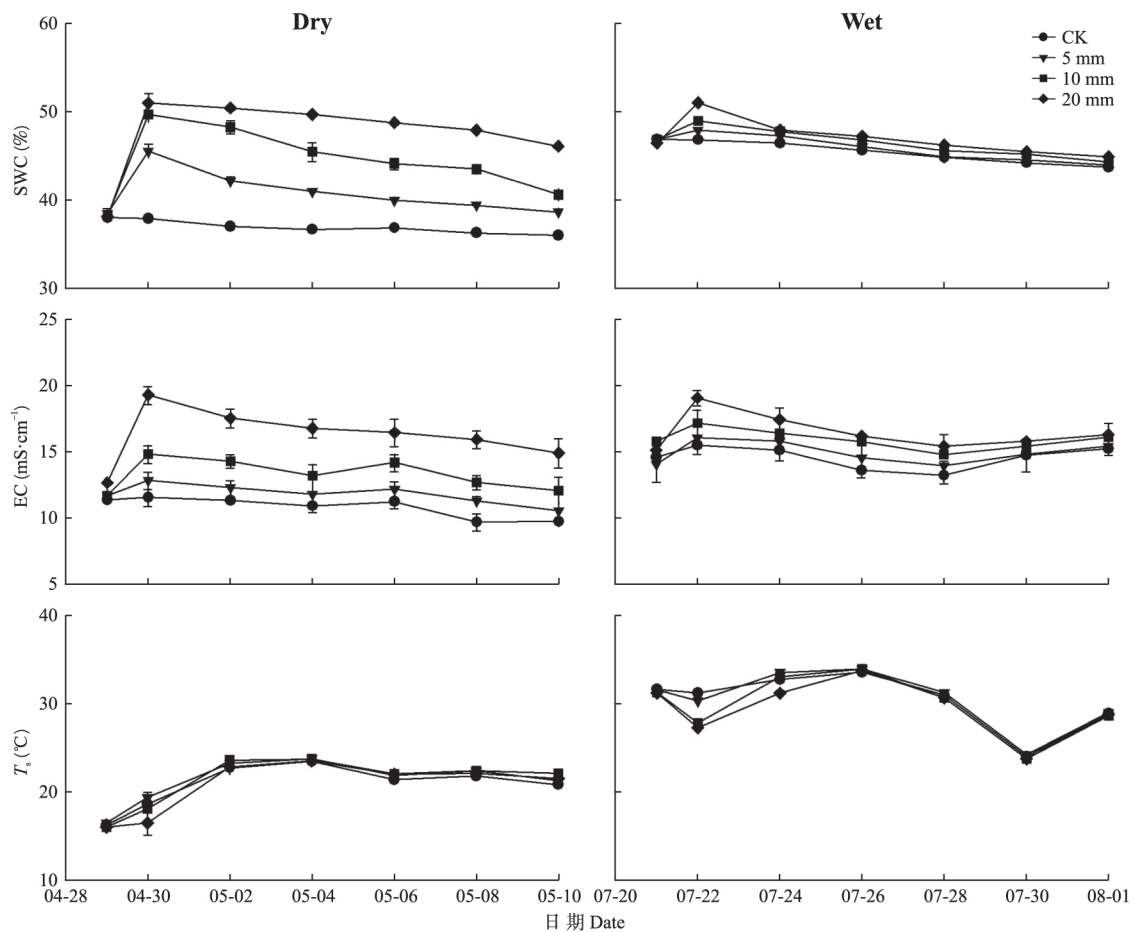


图 2 干旱期和湿润期不同降雨量处理下土壤含水量、温度及盐分的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of soil water content, soil temperature and soil salinity under different rainfall treatments in dry and wet seasons.

SWC: 土壤含水量 Soil water content; T_s : 土壤温度 Soil temperature; EC: 土壤电导率 Soil electrical conductivity. CK: 对照 Control. 下同 The same below.

壤平均含水量,与 CK 相比,各降雨量处理(5、10、20 mm)分别增加了 3.9%、7.5%和 10.2%(图 3)。5 mm 降雨事件对土壤平均盐分含量没有显著影响,而 10 和 20 mm 降雨事件都显著提高了土壤平均盐分含量(分别提高 25.1%和 51.9%)。降雨处理对土壤平均温度没有显著影响。在湿润期,5 mm 降雨事件对土壤平均含水量没有影响,但 10 和 20 mm 降雨量

处理显著提高了土壤平均含水量;5 和 10 mm 降雨量处理对土壤盐分和温度的均值没有显著影响,而 20 mm 降雨量处理显著提高了土壤平均盐分含量,同时显著降低了土壤平均温度。

2.2 土壤 CO₂、CH₄ 通量及其比值的响应特征

统计分析表明,降雨时间和降雨量对土壤 CO₂ 通量的影响存在交互作用,但对土壤 CH₄ 通量以及

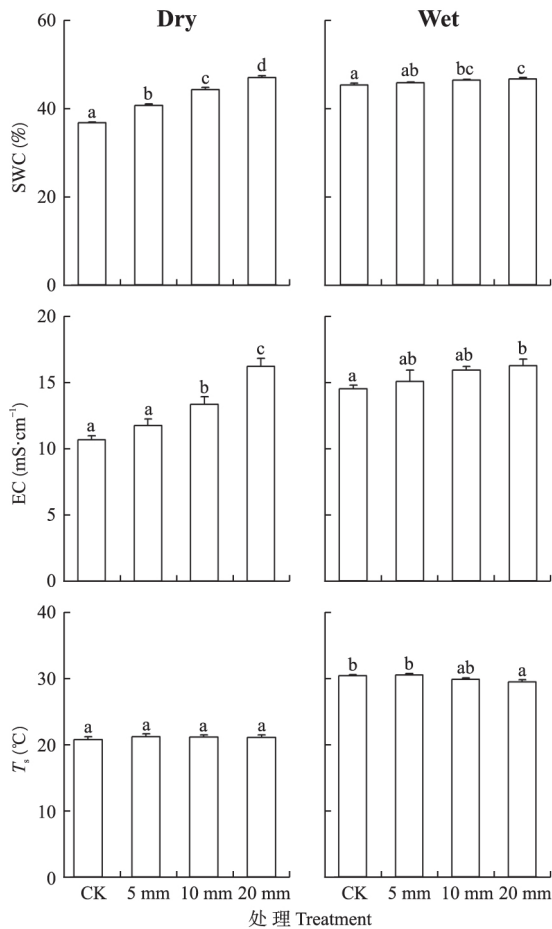


图3 干旱期和湿润期不同降雨量处理下土壤含水量、温度及盐分的均值变化

Fig.3 Change of mean values of soil water content, soil temperature and soil salinity under different rainfall treatments in dry and wet seasons.

不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different letters meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

土壤 CH_4/CO_2 比率的交互作用不显著(表2)。由图4可知,在干旱期,不同降雨量均引起了土壤 CO_2 通量的迅速降低,降雨量越大降低幅度越高,之后随着时间的延长土壤 CO_2 通量均表现出逐渐上升的趋势;降雨量处理下土壤 CH_4 通量和土壤 CH_4/CO_2 比率的变化趋势与土壤 CO_2 通量相反,即相对于CK,土壤 CH_4 通量和土壤 CH_4/CO_2 比率在降雨后迅速升高,而后逐渐降低。在湿润期,降雨后土壤 CO_2 也迅速降低,之后随着时间的推移各处理表现出一致的变化趋势,呈先升后降的波动变化;土壤 CH_4 通量在降雨后没有明显的变化规律;土壤 CH_4/CO_2 比率在降雨后先明显升高,随后迅速降低并保持稳定。

在干旱期,5 mm 降雨事件对土壤 CO_2 通量影响不显著,10 和 20 mm 降雨事件显著降低了土壤 CO_2 通量均值,较 CK 分别下降了 44.6% 和 53.9% (图

5)。降雨对土壤 CH_4 通量和 CH_4/CO_2 比率均值均没有显著影响。在湿润期,降雨对土壤 CO_2 通量均值没有显著影响;同样地,降雨量处理下的 CH_4 通量及土壤 CH_4/CO_2 比率均没有显著变化。

2.3 土壤 CO_2 和 CH_4 通量与环境因子之间的关系

相关分析表明,土壤 CO_2 通量与土壤含水量在干旱期呈显著负相关,而在湿润期无相关性;土壤 CO_2 通量和土壤盐分在两个季节均表现出显著负相关;土壤 CO_2 通量与土壤温度在干旱期无相关关系,而在湿润期呈显著指数正相关。土壤 CH_4 通量除在湿润期与土壤含水量呈显著正相关,在两个季节与其他环境指标均没有相关性。在两个季节,土壤 CH_4/CO_2 比率与土壤水分和盐分都呈显著正相关,而与土壤温度相关性不显著(图6)。此外,图7表明,土壤水分和盐分在两个时期均具显著正相关关系。

3 讨 论

黄河三角洲降水呈现明显的干湿季节特征,不同季节的降雨事件可能会对土壤碳循环过程产生不同的影响。选取远离海岸且不受潮汐影响的黄河三角洲原生盐地碱蓬盐沼湿地为研究对象,通过野外原状土柱的控制试验,研究土壤碳矿化(CO_2 及 CH_4 通量)对不同季节降雨事件的响应发现,降雨时间和降雨量对土壤碳矿化具有显著的交互作用,这表明准确量化降雨事件对该地区土壤碳矿化的影响需要同时考虑降雨时间和降雨量。

3.1 干旱期不同降雨量对土壤碳矿化的影响

在干旱期,降雨事件的发生引起了该滨海湿地土壤 CO_2 通量的迅速下降,且对土壤 CO_2 通量的抑制作用随降雨量的增加而增强,土壤含水量与土壤 CO_2 通量存在显著负相关关系。该结果与许多干旱陆地生态系统的研究结果相反^[16-17]。在干旱生态系统中,降雨事件通常会引起土壤碳矿化和土壤 CO_2 通量的脉冲式响应^[18];例如,在半干旱森林生态系统中,降雨事件使土壤干旱再湿润,微生物的活性增强,从而引起土壤 CO_2 矿化的大幅度增加^[19]。随着时间推移,土壤 CO_2 通量表现出逐渐升高的趋势,这也显著区别于干旱陆地生态系统。

一般而言,土壤碳矿化能力与土壤含水量的关系呈单峰曲线变化^[20]。当土壤含水量较低时,土壤碳矿化能力随土壤水分升高而增强,当土壤水分持续升高超过土壤碳矿化的最适土壤水分时,土壤碳矿化能力则随土壤水分的升高反而降低。在黄河三

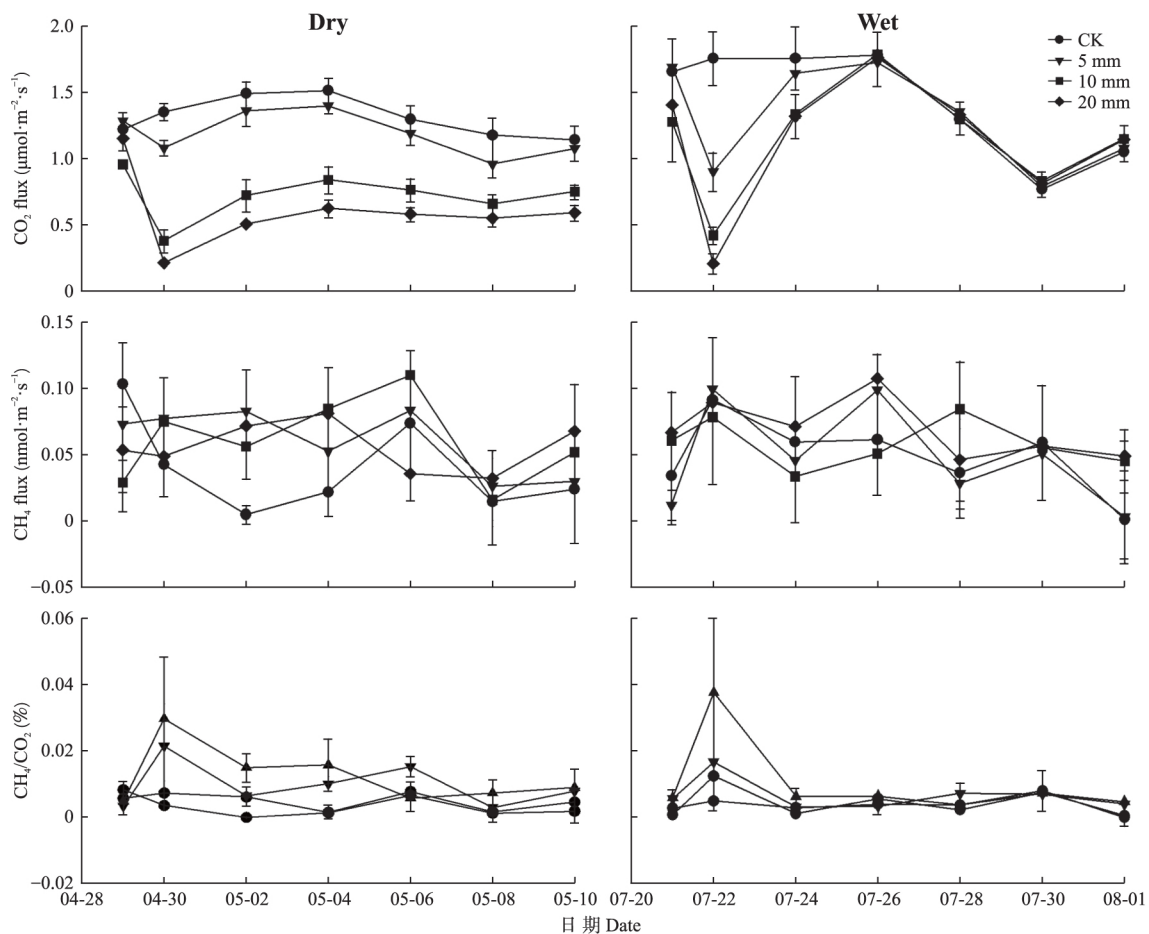


图4 干旱期和湿润期不同降雨量处理下土壤 CO_2 、 CH_4 通量及比率的动态变化

Fig.4 Dynamic changes of soil CO_2 flux, CH_4 flux and their ratio under different rainfall treatments in dry and wet seasons.

CO_2 flux: 土壤 CO_2 通量 Soil CO_2 flux; CH_4 flux: 土壤 CH_4 通量 Soil CH_4 flux; CH_4/CO_2 : 土壤 CH_4 与 CO_2 通量比率 Soil CH_4 flux to CO_2 flux ratio. 下同 The same below.

角洲滨海湿地生态系统,即使在干旱期,土壤仍然保持着较高的含水量。降雨后,土壤含水量迅速升高,土壤厌氧环境的加剧会抑制微生物的活性及酶活性,从而对土壤 CO_2 产生迅速且强烈的抑制作用^[21]。其次,降雨引起土壤水分的增加会降低土壤孔隙度,从而抑制 CO_2 气体在土壤中的扩散速率,导致碳矿化产生的部分 CO_2 气体封存于土壤之中^[22]。此外,土壤碳矿化与土壤氧化还原电位也密切相关^[23]。例如,杨钙仁等^[24]研究表明,湿地中氧化还原电位随着水分的增加而降低,较低的氧化还原电位会抑制有机碳的矿化。因此,降雨引起土壤水分的升高可能会降低氧化还原电位,进而降低微生物活性和碳矿化能力。

在滨海湿地生态系统,除了土壤水分,盐分含量也是影响土壤微生物活性的重要因素^[25]。降雨是该湿地土壤水分的重要来源,而土壤水分则是土壤盐分迁移运动的载体。降雨事件发生后土壤水分向

下入渗带动盐分迁移,旱季土壤蒸发作用强烈则导致土壤中溶解性盐的“表聚”^[26]。降雨量越大,水盐下渗深度越大,盐分运移距离和盐分表聚性越强。土壤中盐分含量的上升一方面会造成土壤团聚体结构(孔隙和通气状况)的改变^[27],另一方面使微生物细胞外的渗透压提高,微生物可能会出现脱水、休眠甚至死亡,从而降低微生物量和微生物活性^[28]。例如,Tripathi 等^[29]在孟加拉湾滨海湿地的研究表明,土壤盐分的升高导致了土壤微生物量和基础呼吸的下降。因此,降雨引起土壤盐分的变化可能会进一步影响土壤微生物活性和功能,抑制土壤碳矿化和 CO_2 的排放。

土壤 CH_4 通量是土壤中 CH_4 产生、氧化和传输综合作用的结果,研究表明滨海湿地的 CH_4 排放量占全球 CH_4 排放总量的 20%~39%^[30]。降雨事件提高了土壤含水量,为激发产甲烷菌活性提供了有利的厌氧环境,从而促进 CH_4 的产生及释放^[30]。但本研究中,该滨海盐沼湿地干旱期不同降雨量处理对

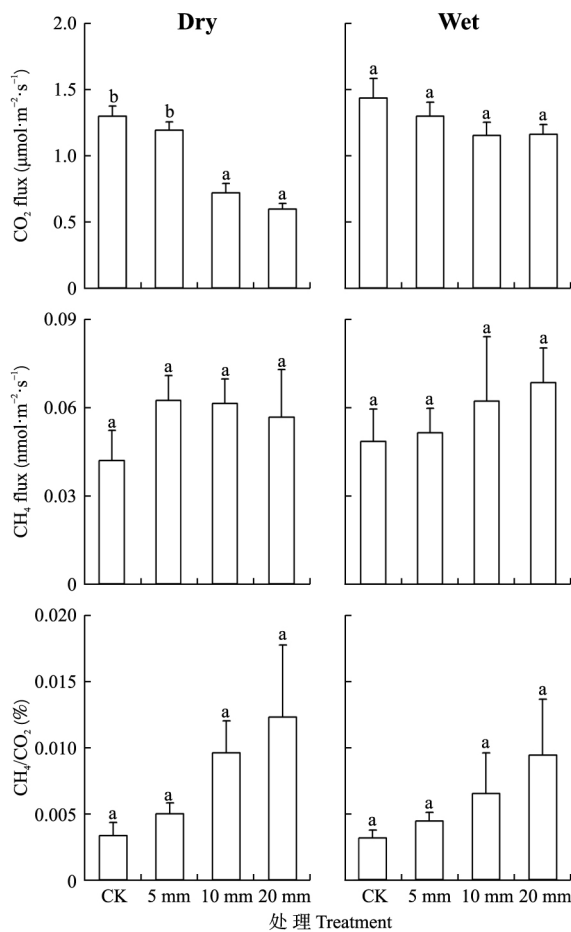


图 5 干旱期和湿润期不同降雨量处理下土壤 CO₂ 和 CH₄ 通量及比率的均值变化

Fig.5 Mean values of soil CO₂ flux, CH₄ flux and their ratio under different rainfall treatments in dry and wet seasons.

土壤 CH₄ 通量没有产生影响,且土壤 CH₄ 通量与土壤水分、盐分及温度无相关性。许多基于滨海湿地的研究表明,CH₄ 产生率与土壤 SO₄²⁻ 密切相关,且 SO₄²⁻ 还原和 CH₄ 产生对醋酸盐和氢等底物存在直接的竞争关系^[31],土壤 SO₄²⁻ 的含量越高,CH₄ 产生越低^[32]。土壤盐分含量是控制土壤 SO₄²⁻ 含量的重要因素^[25]。Luo 等^[32] 在沼泽湿地的研究显示,盐分添加能够显著提高 SO₄²⁻ 含量,从而抑制 CH₄ 产生。本研究中,降雨引起的表层土壤盐分含量升高可能提高了土壤 SO₄²⁻ 含量,进而抑制了土壤 CH₄ 的产生。此外,本研究中测定的土壤 CH₄ 通量值较小且变异性较大,这也可能导致了差异的不显著性。本研究发现,降雨量处理对土壤 CH₄/CO₂ 比率有弱的显著效应($P = 0.065$),同时相关性分析表明,土壤 CH₄/CO₂ 比率与土壤水分和盐分呈显著正相关。降雨事件后土壤含水量和盐分越高,CH₄/CO₂ 比率越高,这表明土壤含水量及盐分的升高有利于土壤

CH₄ 的排放。

3.2 湿润期不同降雨量对土壤碳矿化的影响

湿润期土壤 CO₂ 通量对降雨的响应更加强烈,呈迅速下降趋势。后随时间推移,土壤 CO₂ 通量表现出随土壤含水量的下降逐渐升高的趋势。湿润期降雨事件发生频繁,表层土壤含水量本底值相比于干旱期更高。即使是小降雨也会迅速提高土壤厌氧环境,降低土壤孔隙度及氧化还原电位值,抑制微生物活性及酶活性,从而降低 CO₂ 的排放速率^[21]。10 和 20 mm 降雨量处理尽管显著提高了土壤含水量,但各降雨量处理间土壤 CO₂ 通量没有显著差异,且 CO₂ 通量与土壤水分相关性不显著,其原因可能与湿润期降雨较多且地下水埋藏浅、土壤含水量普遍较高有关^[33-34]。这表明在该滨海盐沼湿地,降雨前的土壤含水量在土壤碳矿化的降雨响应上发挥着至关重要的作用。

本研究发现,大降雨事件(20 mm)显著提高了表层土壤盐分。滨海盐沼湿地土壤盐分变化主要取决于蒸发积盐与淋溶脱盐两个过程,且受植被覆盖度、降雨量及温度等环境因子的影响。崔士友等^[35] 研究发现,植被覆盖与裸地相比显著降低了土壤含盐量;方生等^[36] 在华北平原研究发现,一次大于 25 mm 的降雨事件可以起到淋洗脱盐作用;巨龙等^[37] 发现,气温高且蒸发强烈时,对作物进行过量灌水不仅不利于压盐,反而促进深层土壤盐分向上运移和累积。由于该区域植被稀疏且湿润期土壤蒸发强烈,容易加剧土壤盐分的表聚。本研究中,土壤盐分与土壤 CO₂ 通量呈显著负相关,表明在黄河三角洲滨海盐沼湿地湿润期土壤盐分对土壤碳矿化的抑制作用仍然存在。湿润期土壤含水量普遍较高且地下水埋藏浅,土壤环境因子与土壤 CO₂ 通量的相关性分析表明,土壤盐分和温度对土壤 CO₂ 通量的贡献比土壤水分更大。

在湿润期,尽管降雨对土壤 CH₄ 通量平均值没有显著影响,但相关分析显示,土壤 CH₄ 通量与土壤含水量呈显著正相关,这说明土壤含水量越高,厌氧条件越充分,则土壤 CH₄ 排放潜力越大。Ding 等^[38] 在滨海沼泽湿地研究中得到同样的结果,高土壤含水量能显著降低沉积物中的氧化还原电位,从而刺激了 CH₄ 的产生。湿润期与干旱期相似,土壤 CH₄/CO₂ 比率比土壤含水量和盐度均呈正相关,但湿润期的斜率比干旱期要大,说明在湿润期土壤水分和盐分的增加比干旱期更有利于土壤 CH₄ 的排放。在百年尺度上,大气 CH₄ 的增温潜力是 CO₂ 的

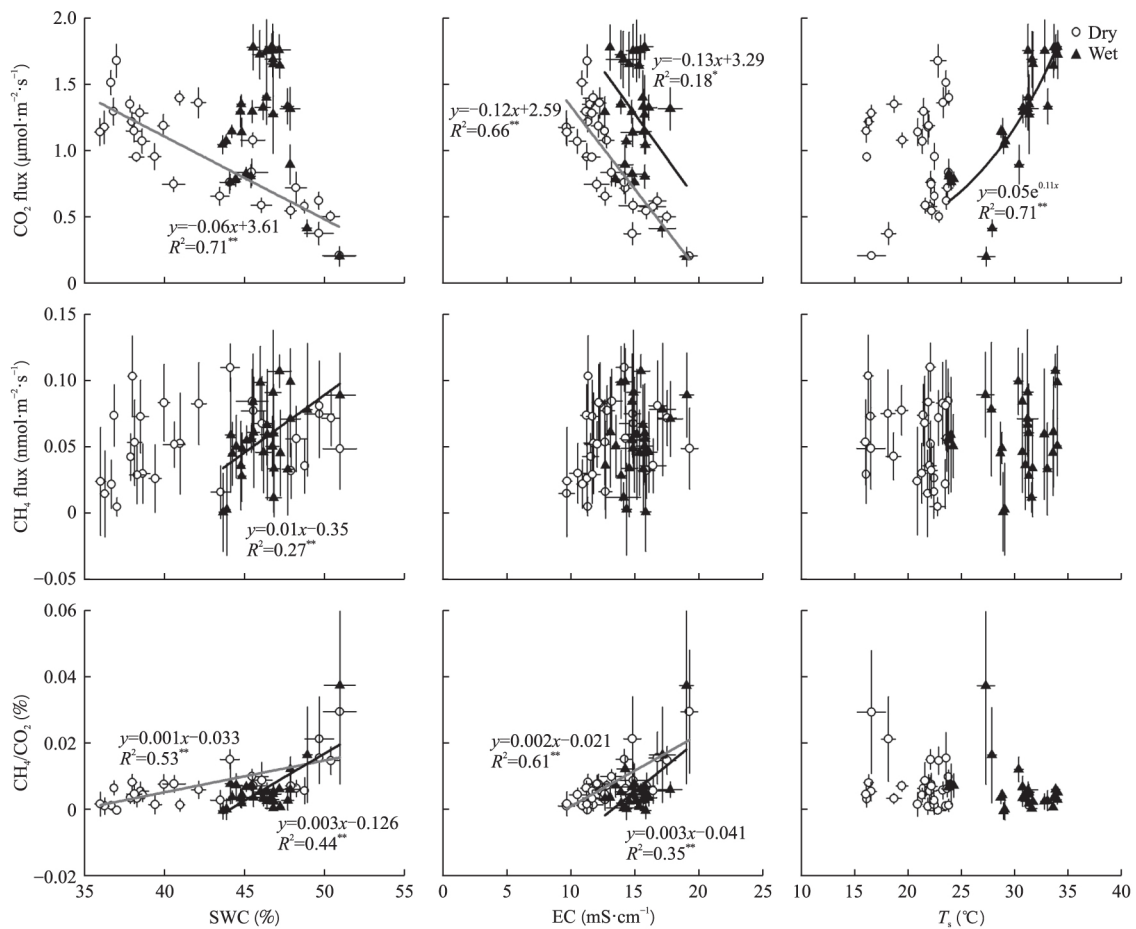


图 6 干旱期及湿润期土壤 CO₂、CH₄ 通量、CH₄/CO₂ 比率与环境因素的相关关系

Fig.6 Correlations between soil CO₂ flux, CH₄ flux, CH₄/CO₂ ratio and environmental factors in dry and wet seasons.

* P<0.05; ** P<0.01. 下同 The same below.

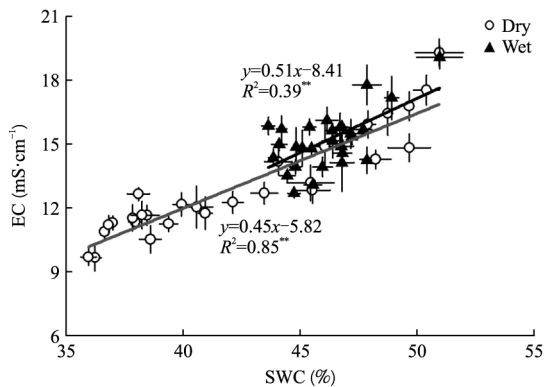


图 7 干旱期及湿润期土壤含水量和土壤盐分的相关关系

Fig.7 Correlation between soil water content and soil salinity in dry and wet seasons.

25 倍^[39-40] 降雨引起的土壤碳矿化 CH₄/CO₂ 比率的变化可能会对区域的碳循环具有深远影响。

参考文献

predictive and interdisciplinary climate change ecosystem experiments. *Nature Climate Change*, 2019, **9**: 809–816

[2] 方精云,朱江玲,王少鹏,等. 全球变暖、碳排放及不确定性. *中国科学: 地球科学*, 2011, **41**(10): 1385–1395 [Fang J-Y, Zhu J-L, Wang S-P, et al. Global warming, human-induced carbon emissions, and their uncertainties. *Scientia Sinica (Terrestrial Earth and Planetary Sciences)*, 2011, **41**(10): 1385–1395]

[3] Kramer MG, Chadwick OA. Climate-driven thresholds in reactive mineral retention of soil carbon at the global scale. *Nature Climate Change*, 2018, **8**: 1104–1108

[4] Prommer J, Walker TW, Wanek W, et al. Increased microbial growth, biomass, and turnover drive soil organic carbon accumulation at higher plant diversity. *Global Change Biology*, 2020, **26**: 669–681

[5] Livesley SJ, Andrusiak SM. Temperate mangrove and salt marsh sediments are a small methane and nitrous oxide source but important carbon store. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, **97**: 19–27

[6] Hoover DJ, Odigie KO, Swarzenski PW, et al. Sea-level rise and coastal groundwater inundation and shoaling at select sites in California, USA. *Journal of Hydrology-Regional Studies*, 2017, **11**: 234–249

- [7] Chambers LG , Osborne TZ , Reddy KR. Effect of salinity-altering pulsing events on soil organic carbon loss along an intertidal wetland gradient: A laboratory experiment. *Biogeochemistry* , 2013 , **115**: 363–383
- [8] Chow AT , Tanji KK , Gao S , *et al.* Temperature , water content and wet-dry cycle effects on DOC production and carbon mineralization in agricultural peat soils. *Soil Biology & Biochemistry* , 2006 , **38**: 477–488
- [9] Huxman TE , Snyder KA , Tissue D , *et al.* Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. *Oecologia* , 2004 , **141**: 254–268
- [10] Maucleri C , Zhang Y , McDaniel MD , *et al.* Short-term effects of biochar and salinity on soil greenhouse gas emissions from a semi-arid Australian soil after re-wetting. *Geoderma* , 2017 , **307**: 267–276
- [11] Negandhi K , Edwards G , Kelleway JJ , *et al.* Blue carbon potential of coastal wetland restoration varies with inundation and rainfall. *Scientific Reports* , 2019 , **9**: 743–756
- [12] Huang G , Li L , Su YG , *et al.* Differential seasonal effects of water addition and nitrogen fertilization on microbial biomass and diversity in a temperate desert. *Catena* , 2018 , **161**: 27–36
- [13] Li JY , Qu WD , Han GX , *et al.* Effects of drying-rewetting frequency on vertical and lateral loss of soil organic carbon in a tidal salt marsh. *Wetlands* , 2020 , **40** , doi: 10.1007/s13157-020-01286-5
- [14] 贺强 , 崔保山 , 赵欣胜 , 等. 黄河河口盐沼植被分布、多样性与土壤化学因子的相关关系. *生态学报* , 2009 , **29**(2) : 676–687 [He Q , Cui B-S , Zhao X-S , *et al.* Relationships between salt marsh vegetation distribution/diversity and soil chemical factors in the Yellow River Estuary , China. *Acta Ecologica Sinica* , 2009 , **29**(2) : 676–687]
- [15] Han GX , Yang LQ , Yu JB , *et al.* Environmental controls on net ecosystem CO₂ exchange over a reed (*Phragmites australis*) wetland in the Yellow River Delta , China. *Estuaries and Coasts* , 2013 , **36**: 401–413
- [16] Casals P , Romanya J , Cortina J , *et al.* CO₂ efflux from a Mediterranean semi-arid forest soil. I. Seasonality and effects of stoniness. *Biogeochemistry* , 2000 , **48**: 261–281
- [17] Placella SA , Brodie EL , Firestone MK. Rainfall-induced carbon dioxide pulses result from sequential resuscitation of phylogenetically clustered microbial groups. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* , 2012 , **109**: 10931–10936
- [18] Austin AT , Yahdjian L , Stark JM , *et al.* Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. *Oecologia* , 2004 , **141**: 221–235
- [19] Huang G , Li Y , Su YG. Effects of increasing precipitation on soil microbial community composition and soil respiration in a temperate desert , Northwestern China. *Soil Biology & Biochemistry* , 2015 , **83**: 52–56
- [20] Hstedt U , Nordgren A , Malmer A. Optimum soil water for soil respiration before and after amendment with glucose in humid tropical Acrisols and a boreal mor layer. *Soil Biology & Biochemistry* , 2000 , **32**: 1591–1599
- [21] Gullledge J , Schimel JP. Moisture control over atmospheric CH₄ consumption and CO₂ production in diverse Alaskan soils. *Soil Biology & Biochemistry* , 1998 , **30**: 1127–1132
- [22] Jimenez KL , Starr G , Staudhammer CL , *et al.* Carbon dioxide exchange rates from short- and long-hydroperiod Everglades freshwater marsh. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* , 2012 , **117**: 10.1029/2012JG-002117
- [23] McNicol G , Silver WL. Separate effects of flooding and anaerobiosis on soil greenhouse gas emissions and redox sensitive biogeochemistry. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* , 2014 , **119**: 557–566
- [24] 杨钙仁 , 童成立 , 肖和艾 , 等. 水分控制下的湿地沉积物氧化还原电位及其对有机碳矿化的影响. *环境科学* , 2009 , **30**(8) : 2381–2386 [Yang G-R , Tong C-L , Xiao H-A , *et al.* Effects of water content on redox potential and carbon mineralization of wetland sediments. *Environmental Science* , 2009 , **30**(8) : 2381–2386]
- [25] 王洁 , 袁俊吉 , 刘德燕 , 等. 滨海湿地甲烷产生途径和产甲烷菌研究进展. *应用生态学报* , 2016 , **27**(3) : 993–1001 [Wang J , Yuan J-J , Liu D-Y , *et al.* Research progresses on methanogenesis pathway and methanogens in coastal wetlands. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2016 , **27**(3) : 993–1001]
- [26] 王增丽 , 董平国 , 樊晓康 , 等. 膜下滴灌不同灌溉定额对土壤水盐分布和春玉米产量的影响. *中国农业科学* , 2016 , **49**(12) : 2345–2354 [Wang Z-L , Dong P-G , Fan X-K , *et al.* Effects of irrigation quota on distribution of soil water-salt and yield of spring maize with drip irrigation under mulch. *Scientia Agricultura Sinica* , 2016 , **49**(12) : 2345–2354]
- [27] Rath KM , Rousk J. Salt effects on the soil microbial decomposer community and their role in organic carbon cycling: A review. *Soil Biology & Biochemistry* , 2015 , **81**: 108–123
- [28] Setia R , Marschner P , Baldock J , *et al.* Salinity effects on carbon mineralization in soils of varying texture. *Soil Biology and Biochemistry* , 2011 , **43**: 1908–1916
- [29] Tripathi S , Kumari S , Chakraborty A , *et al.* Microbial biomass and its activities in salt-affected coastal soils. *Biology and Fertility of Soils* , 2006 , **42**: 273–277
- [30] Mer JL , Roger P. Production , oxidation , emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology* , 2001 , **37**: 25–50
- [31] 王维奇 , 曾从盛 , 仝川. 潮汐盐湿地甲烷产生及其对硫酸盐响应研究进展. *地理科学* , 2010 , **30**(1) : 157–160 [Wang W-Q , Zeng C-S , Tong C. Reviews on methane production and reaction to sulfate in saline wetlands. *Scientia Geographica Sinica* , 2010 , **30**(1) : 157–160]
- [32] Luo M , Zhai ZF , Ye RZ , *et al.* Carbon mineralization in tidal freshwater marsh soils at the intersection of low-level saltwater intrusion and ferric iron loading. *Catena* ,

- 2020, **193**: 10.1016/j.catena.2020.104644
- [33] Hall SJ, McDowell WH, Silver WL. When wet gets wetter: Decoupling of moisture, redox biogeochemistry, and greenhouse gas fluxes in a humid tropical forest soil. *Ecosystems*, 2013, **16**: 576–589
- [34] Han G, Sun B, Chu X, et al. Precipitation events reduce soil respiration in a coastal wetland based on four-year continuous field measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, **256**: 292–303
- [35] 崔士友, 张蛟. 秸秆和植被覆盖对江苏滨海盐土土壤盐分变化的影响. *农业资源与环境学报*, 2017, **34**(6): 509–516 [Cui S-Y, Zhang J. Effects of straw mulching and vegetative covering on soil salinity dynamics of salt affected soils in Jiangsu coastal region, China. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, **34**(6): 509–516]
- [36] 方生, 陈秀玲. 华北平原大气降水对土壤淋洗脱盐的影响. *土壤学报*, 2005, **42**(5): 28–34 [Fang S, Chen X-L. Influence of atmospheric precipitation on soil leaching and desalinization in the north China plain. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, **42**(5): 28–34]
- [37] 巨龙, 王全九, 王琳芳, 等. 灌水量对半干旱区土壤水盐分布特征及冬小麦产量的影响. *农业工程学报*, 2007, **23**(1): 86–90 [Ju L, Wang Q-J, Wang L-F, et al. Effects of irrigation amounts on yield of winter wheat and distribution characteristics of soil water-salt in semi-arid region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, **23**(1): 86–90]
- [38] Ding W, Zhang Y, Cai Z. Impact of permanent inundation on methane emissions from a *Spartina alterniflora* coastal salt marsh. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**: 3894–3900
- [39] IPCC. Summary for policymakers. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013: 3–32
- [40] 张翠景, 贺纪正, 沈菊培. 全球变化野外控制试验及其在土壤微生物生态学研究中的应用. *应用生态学报*, 2016, **27**(5): 1663–1673 [Zhang C-J, He J-Z, Shen J-P. Global change field manipulative experiments and their applications in soil microbial ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(5): 1663–1673]

作者简介 李雪, 女, 1996年生, 硕士研究生. 主要从事滨海湿地碳循环研究. E-mail: lixue19961007@163.com

责任编辑 肖红

李雪, 董杰, 李培广, 等. 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

Li X, Dong J, Li P-G, et al. Co-regulation of rainfall amount and timing on soil carbon mineralization in a typical salt marsh of the Yellow River Delta, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(2): 581–590