

水盐变化对滨海湿地土壤有机碳累积与碳排放的影响综述*

白军红[†] 刘 玥 赵庆庆 王军静 张光亮 陈国柱 刘 哲

(北京师范大学环境学院,水环境模拟国家重点实验室,100875,北京)

摘要 滨海湿地作为海岸带蓝碳生态系统的重要组成部分,具有巨大的碳捕获和碳封存潜力,在减缓气候变暖方面具有重要意义.水盐变化通过影响滨海湿地土壤有机碳的累积和排放过程实现对滨海湿地生态系统碳收支的调控.本文综述了水盐变化对滨海湿地土壤有机碳累积和碳排放过程的影响,以及滨海湿地土壤碳排放研究方法等方面的研究进展,分析了水盐驱动下滨海湿地土壤有机碳分解的微生物作用机制.针对当前研究存在的不足,提出今后应重点关注滨海湿地土壤有机碳分解的温度、湿度和盐度敏感性及其水盐-温度的协同作用机制,氮磷输入和多重污染胁迫对滨海湿地土壤有机碳排放的作用机制,以及滨海湿地土壤微生物碳代谢过程与氮磷硫代谢过程的耦合作用及其水盐驱动机制等方面的研究,以期揭示水盐变化对滨海湿地土壤碳循环的作用机制,为气候变化背景下滨海湿地的碳汇功能提升与管理提供科学依据.

关键词 水盐变化;土壤有机碳累积;碳排放;微生物分解;滨海湿地

中图分类号 X53

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022081

0 引言

滨海湿地位于海陆交错带,是在潮流和径流共同驱动下形成的复杂生态系统^[1].物质交换频繁,物理、化学和生物要素变化复杂,以及对外界环境压力的响应敏感等特征使滨海湿地成为研究全球气候变化的理想区域.在水文连通强度的影响下,滨海湿地自海向陆具有明显的水盐梯度特征^[2-3],盐离子分布、土壤氧化还原状况、土壤理化性质及微生物群落结构等均呈现明显的梯度变化规律,从而对滨海湿地土壤碳循环产生重要影响^[2,4-5].在全球气候变暖背景下,气温升高会促进异养微生物对土壤有机质的分解,造成更多的CO₂向大气中释放^[6];同时气候变暖导致的海平面上升和海水入侵会对滨海湿地土壤碳循环产生反馈效应^[7].据政府间气候变化专门委员会(IPCC)估算,2050年的全球CO₂排放量必须在2000年的基础上减少85%,才能阻止气温上升2℃^[8];在双碳目标约束下,需要提升自然生态系统对碳的固定和储存能力^[9],而通过“蓝碳”(blue carbon)生态系统固碳增汇则是一种有效的途径^[10].滨海湿地较高的初级生产力和缓

慢的有机质分解速率使其成为缓解全球气候变暖的有效蓝色碳汇^[11],被全球学者广泛关注.因此,研究滨海湿地土壤有机碳累积和排放过程,对于应对全球气候变化和助力碳中和目标实现具有重要的科学意义.

在高强度人类活动和气候变化的双重影响下,滨海湿地退化趋势日益加剧.据统计,20世纪以来全球滨海湿地面积每年损失0.7%~1.2%,已累计造成约63%的滨海湿地退化或丧失^[12],显著降低了滨海湿地生态系统的碳汇功能.水盐变化能够改变滨海湿地植物群落结构与凋落物的输入,进而影响土壤有机碳的捕获和封存能力^[13];通过水盐调控滨海湿地土壤碳矿化过程,可以有效提高或者降低碳排放速率,改变碳排放模式,导致滨海湿地的碳源/汇功能发生转变^[14].但目前滨海湿地土壤有机碳固存和排放过程对水盐变化的响应机制尚不明确,这在很大程度上限制了滨海湿地碳汇功能的提升与管理.

因此,本文综述了水盐变化下滨海湿地土壤有机碳累积、碳排放、微生物调控机制,以及土壤碳排放的研究方法等方面的进展,以为滨海湿地生态服务功能提升和蓝碳增汇、双碳战略目标实现提供科学指导.

* 国家自然科学基金委-山东联合基金资助项目(U2006215)

[†] 通信作者:白军红(1976—),男,教授,博士生导师.研究方向:湿地水土过程和调控、湿地退化与生态恢复. E-mail: junhongbai@163.com
收稿日期:2022-04-11

1 水盐变化对滨海湿地土壤有机碳累积的影响

作为重要的蓝碳生态系统,滨海湿地具有较高的碳埋藏速率和固碳能力.滨海湿地有机碳累积速度为 $30\sim 100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,而相同时间内陆地生态系统速度仅为 $5\sim 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [14].其中,滨海盐沼湿地的固碳速率为 $(218 \pm 24) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,约为陆地森林生态系统的 50 倍[17].因此,滨海湿地土壤有机碳埋藏潜力巨大,在缓解全球气候变暖方面将发挥重要作用.

据 IPCC 报道,至 2100 年全球海平面将会上升 $0.5\sim 1.0 \text{ m}$,且其升高速度高于很多滨海湿地的堆积速率[15].海平面上升和海水入侵引起的盐度变化会在短期内改变有机碳的累积和分解速率[16],从而改变滨海湿地土壤储碳量[17].海平面上升一方面通过直接调控水-土界面 O_2 的可利用性,以及间接改变植物物种组成、生物量和初级生产力影响土壤有机碳的分解[17];另一方面还会通过降低微生物呼吸速率、有机碳分解速率,增加盐沼湿地土壤有机碳累积[18].Mudd 等[19]研究发现随着海平面上升,土壤有机碳的沉积速率逐渐增加,直至达到一个临界阈值时,有机碳的固定和积累停止.而 DeLaune 等[15]指出,由于海平面不断上升,路易斯安那州滨海湿地将由碳汇向碳源转变.

土壤有机碳储量取决于有机碳的输入和输出之间的平衡[7],受气温、降水、水文过程、植被类型、土壤理化性质等多种因素的制约[20].不同植被带土壤有机碳储量年增量从高潮滩向低潮滩递减[21].互花米草入侵后滨海湿地土壤有机碳储量随入侵时间线性增加[22].滨海湿地长期处于持续性淹水和周期性涨落潮的作用下,土壤有机质的分解受到湿地水文条件、水盐分布格局、咸淡水交互等因素的制约,从而影响着土壤的碳固存过程[23].水分变化会影响土壤内部通气性和溶解氧的分布[24].长期处于淹水条件下的土壤, O_2 可利用性下降,厌氧矿化贡献增强,有机质矿化分解缓慢,土壤有机碳易发生累积[25];相反,当土壤水分减少时, O_2 会扩散到土壤深处,刺激好氧呼吸,提高有机碳的分解速率[26].海平面上升则可能减缓有机质的分解速率,提高潮间带湿地土壤的碳存储能力[27].有学者发现,由于盐分改变了土壤固液面之间的性质和作用,土壤持水量随土壤含盐量的升高而增加[28].同时,盐分会改变土壤物理性质,使土壤颗粒絮凝或者分散,导致土壤结构发生变化,从而影响有机质的溶解性[29].已有研究报道土壤有机碳含量与土壤有机质、含盐量和含水率间存在显著相关性[30].潮流恢复

和淡水恢复均能通过改变水盐条件显著提升滨海湿地土壤有机碳的含量[31].Setia 等[32]根据模型预测结果,推断出在高盐胁迫下土壤碳累积速率呈下降趋势.而且,土壤中盐离子类型也会影响有机质的溶解性[33].多价态的阳离子可以提高土壤颗粒对有机质的吸附,从而降低腐殖质化合物的溶解度[34].可溶性盐离子,特别是 Cl^- 和 SO_4^{2-} 还会改变碳氮等元素的生物地球化学循环过程,而离子强度的增加也会打破土壤原有的化学平衡状态[35].

水盐条件制约着滨海湿地的植被群落结构和分布格局,土壤有机碳储量分布主要受制于植物循环的影响[36].湿地地貌学特征、土壤理化特征(如矿物学特征和质地)和生物学特征(如初级生产力、凋落物输入和生物分解)均是土壤有机碳储量的重要控制因素[37].滨海湿地不同潮滩的淹水时间和水动力条件能够影响植物凋落物的分解和有机质的输入,较长的淹水期促进了凋落物的分解和碳氮归还土壤[38];植被对水流的缓冲作用减小了中高潮滩的水流剪切力,使得大部分植物凋落物进入土壤转化为土壤有机质[39].盐度制约主要通过改变土壤渗透势和基质势影响植物生长和植被的初级生产力[40],进而影响土壤有机碳的空间分布格局.较高的盐度及盐离子的毒性作用会抑制土壤生物活性和植物的生长,降低植物生产力,影响土壤有机质的输入[41-42].如崇明东滩盐沼湿地植被的有机碳储量由高到低呈现为芦苇群落、互花米草群落、海三棱草群落的变化规律[21].以退化湿地修复为目的的淡水修复和生态补水工程补充了滨海湿地淡水资源,显著降低了退化湿地的土壤盐度[31],改善了湿地植被覆被状况,使生态系统碳储功能趋于稳定[43-44].然而,也有研究报道滨海湿地土壤有机碳含量和储量随着盐度的增加而升高,且在植被生存耐受范围内土壤盐度越高的区域有机碳含量也越高,这可能与潮汐造成的顶托作用导致上游输入的有机物沉积有关[45].水沙变化塑造的地貌形态与水盐运移过程密切相关,当前研究重点关注了不同水盐条件下沉积过程和植被类型对土壤有机碳累积的影响[46-47],较少关注水沙变化导致的侵蚀过程对有机碳损失的影响;滨海湿地碳循环模型关注了植物凋落物、土壤水分、养分和质地等参数,较少考虑水沙、水盐变化与湿地演化、植物群落演替和微生物群落结构变化过程的影响[48],增加了滨海湿地碳储量估算的不确定性.

土壤碳库微小的变化都可能导致大气 CO_2 含量的显著变化,从而影响全球气候.土壤活性有机碳在总有机碳中比例较小,但是其直接参与土壤生化转化过程,对土壤碳库平衡具有重要意义[49].土壤微生物

生物量碳(MBC)和可溶性有机碳(DOC)是土壤活性有机碳库的2个重要指标^[50]。MBC在凋落物分解、土壤养分循环中发挥着重要作用,是反映土壤生态系统功能的敏感指标,可用于监测及预测土壤有机碳动态变化和长期变化。湿地水盐变化在一定程度上决定了不同土地覆被类型和土壤性质的时空分布特征,从而驱动了土壤活性有机碳的动态变化^[51-52]。在滨海湿地中土壤MBC与EC、盐离子含量呈显著负相关^[49]。但也有研究发现黄河口湿地土壤MBC含量在盐度为 0.9×10^{-3} 和 2.9×10^{-3} 时出现最小值,而在盐度为 2.0×10^{-3} 时达到最大值^[50],产生这种差异的原因可能在于微生物活动对土壤水分的高度依赖性。相比之下,土壤DOC可与土壤中的金属离子反应并结合影响土壤元素循环,同时作为微生物的主要能源和营养物质,其疏水部分可以为微生物生长提供基质和能量^[53]。例如,与土壤物理因素相比,土壤DOC含量变化能够更好地解释甲烷氧化速率的变化^[54]。因此,土壤活性碳库直接影响着土壤微生物的活性和温室气体排放^[50],可快速表征土壤碳库的变化。

除水盐条件外,滨海湿地土壤碳库的变化还受制于氮磷等养分的水平和赋存形态^[55]。已有研究表明,外源氮磷输入能够影响滨海湿地土壤有机碳的存储能力^[55]。当氮输入量达到一定水平时,凋落物分解加速,将会增加湿地土壤有机碳储量^[51]。外部磷负荷可能会改变土壤碳的生物可利用性,土壤DOC含量及其与有机碳的比值随磷负荷的增加而增加^[56]。此外,微塑料作为碳链高分子聚合物,风化降解产生的一些小分子物质可能作为微生物的碳代谢底物,最终影响滨海湿地土壤有机碳的分解过程。微塑料也可通过影响土壤密度和土壤团聚体而改变土壤性质,如根系穿透阻力、持水能力等,影响植物生长和凋落物分解速率,从而导致湿地土壤碳损失^[57]。当前滨海湿地土壤有机碳累积方面的研究,多侧重于水盐变化及土壤性质改变对土壤有机碳分解和累积过程的影响,而对于水盐变化条件下多重污染物输入对滨海湿地土壤有机碳分解和碳库稳定性的影响机制尚不明确。

2 水盐变化对土壤碳排放过程的影响及其研究方法

2.1 水盐变化对土壤碳排放过程的影响 土壤呼吸是指土壤中产生并向大气释放CO₂的过程,主要由土壤微生物和根系产生,是一个受多种因素制约的生化过程^[58]。土壤有机质、土壤温度、凋落物、土壤pH、土壤水分、土壤碳氮含量等非生物因子,以及植被类型、植物地上和地下生物量、根系活力等生物因子均

会影响土壤呼吸作用。其中,水文条件决定了湿地土壤氧化还原状况,从而影响CO₂和CH₄的生成^[59],对湿地土壤碳排放具有重要调控作用(图1)。因此,潮汐淹水频率、淹水历时和淹水周期等都将对滨海湿地土壤的碳排放模式产生影响^[60-61]。随着水分增加,湿地土壤含水率趋向饱和并逐渐形成缺氧环境,进而通过限制植物根区O₂有效性和微生物活性来降低土壤呼吸^[62]。土壤含水率及水位通过改变O₂在土壤中的渗透性和溶解氧的分布影响湿地土壤好氧/厌氧边界的深度和氧化还原状况。因此,土壤水分条件的变化将显著影响湿地土壤碳矿化和排放过程^[63-65]。当湿地土壤含水率下降时,因氧化作用的增强和分解速率的增大导致湿地土壤有机碳储量下降^[66];而一旦退化湿地的水文条件恢复后,湿地可由碳源向碳汇转化^[67]。Sahrawat^[68]也指出淹水促进了土壤有机碳的累积,抑制了土壤有机碳的矿化。然而,张敬智等^[69]通过室内培养实验发现,土壤短暂淹水促进了有机碳的矿化过程,这可能是因为淹水条件下短期培养降低了土壤氧化还原电位,抑制了好氧微生物的生长;随着培养时间延长,土壤中DOC含量增加,为微生物的生长代谢提供了更多的可利用性碳源^[50]。地下水位波动也能够影响滨海湿地土壤CO₂的排放。Cui等^[70]通过对盐沼湿地土壤CO₂排放的监测发现,当地下水位从-168 cm抬升到-3 cm时,CO₂排放通量从 $146.52 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $54.32 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

土壤盐度也是滨海湿地土壤CO₂排放的关键制约因子(图1)。在滨海湿地中,淡水沼泽湿地土壤CO₂排放量最高,半咸水湿地次之,而盐沼湿地土壤最低^[71];土壤CO₂排放量总体上呈现随盐度升高而降低的趋势^[72]。土壤盐度升高可以通过改变有机碳矿化的速率和途径降低有机质累积速率^[73],导致土壤呼吸速率降低20%^[65];其原因在于土壤溶液中盐分增大,胞外渗透势改变导致微生物失活、死亡,从而减弱微生物对土壤有机碳的分解作用^[33]。然而,也有研究发现在淡水湿地中土壤盐度升高可以促进土壤有机碳矿化速率^[74]。当淡水沼泽湿地盐度提升至 6×10^{-3} ~ 9×10^{-3} 时,可使CO₂排放量增加50%~80%^[75]。在海水入侵条件下,低盐度($0 \sim 2 \times 10^{-3}$)湿地土壤盐分增加促进了微生物分解速率而使土壤有机碳矿化能力提高^[76];而当较高盐度($2 \times 10^{-3} \sim 15 \times 10^{-3}$)湿地土壤盐分增加时,土壤微生物活性降低,导致土壤呼吸减弱^[65, 77]。因此,土壤有机碳的矿化速率对于盐度的响应可能存在于一个阈值效应,在盐度较低的范围土壤有机碳矿化速率与盐度呈正相关,超出这个阈值则随盐度增加而下降。

盐基离子的类型也是影响有机碳分解的重要因

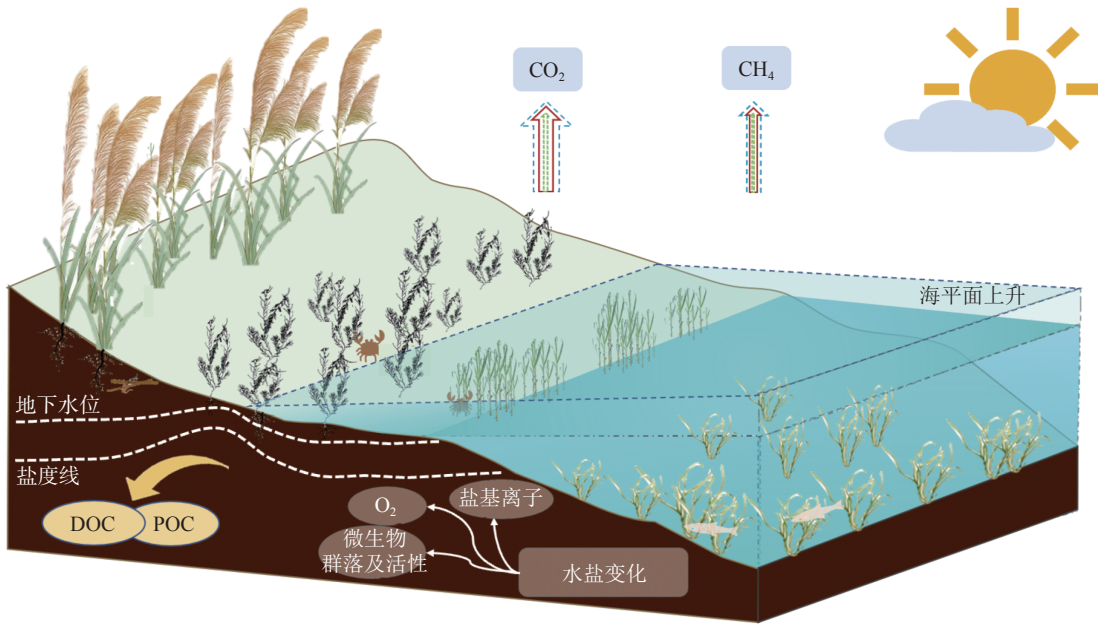


图 1 水盐变化对滨海湿地土壤碳排放的影响示意

素(图 1)。盐分条件反映了土壤溶液中的离子强度,影响着土壤团聚体表面有机质的活性^[78]。由于湿地常处于淹水环境, O_2 仅分布在土壤表层很浅的范围内(2~5 cm)^[64]。在厌氧条件下,当 SO_4^{2-} 含量较低时,产甲烷过程是主要的厌氧碳矿化途径。当 SO_4^{2-} 含量增加时, SO_4^{2-} 还原将取代产甲烷过程而成为有机碳厌氧矿化的主要过程;该过程将导致 CO_2 排放量升高和 CH_4 排放量降低^[79]。Chmura 等^[80] 研究发现,盐沼转化为淡水生态系统后,由于 SO_4^{2-} 输入量减少, CH_4 排放量增加。当盐沼湿地的盐度降至 2×10^{-3} 和 5×10^{-3} 时,湿地 CO_2 释放量分别提高了 57% 和 36%,而 CH_4 的产生分别量减少了 77% 和 89%^[81]。当 Na^+ 含量较高时,矿物结合位点上的有机物出现解吸,经过发酵或水解成为小分子有机物质,为微生物代谢过程提供更多的可利用性碳源^[34, 79]。

水盐交互作用是土壤有机碳循环过程的重要驱动因素(图 1)。水分变化会直接改变土壤的盐分条件;海水入侵和滨海湿地水文连通受阻均会增加土壤盐度,而淡水输入则会降低土壤盐度。在低盐条件下($< 5 \times 10^{-3}$),水位或淹水周期是驱动土壤碳循环过程的主要因子,而盐分对碳循环的短期影响可以忽略不计^[82]。Hu 等^[71] 对闽江口淡水湿地的研究发现,当盐度增加量 $< 5 \times 10^{-3}$ 时,海平面上升和海水入侵可以降低土壤 CH_4 排放量,但对土壤 CO_2 排放量无显著影响。在淡水湿地中,高水位对土壤 CO_2 的排放具有抑制作用,但对土壤 CH_4 排放具有促进作用^[63, 83]。Chambers 等^[4] 指出,处于淹水状态的湿地水位升高时,土壤 CO_2 排放速率增加了 35%~37%;当淹水时间延长,盐度升高

时, CO_2 排放速率下降了 19%~26%。在受潮汐作用影响的潮间带湿地,土壤碳排放过程还受制于潮汐水位和海水中盐基离子的组成比例^[60];在温度较高的夏季,潮汐作用取代温度成为土壤呼吸排放的首要影响因素^[84]。

全球气候变暖背景下海平面上升导致的海水入侵和气温升高会显著影响滨海湿地土壤碳排放过程。在水盐变化条件下,滨海湿地土壤碳排放对温度具有一定的依赖性^[85]。温度升高对湿地土壤 CO_2 和 CH_4 的排放具有促进作用,当温度从 10 °C 升高至 20 °C 时,滨海芦苇湿地 CO_2 排放速率提高了 70%~136%^[86]。但当地下水埋深较深时,湿地土壤碳排放过程对温度的依赖性减弱。水位和盐度的交互作用能够影响湿地土壤碳排放的温度敏感性,改变湿地土壤碳排放模式^[87-88]。但是,目前研究大多集中在单一要素对湿地土壤碳排放过程的影响,强调了滨海湿地土壤碳排放温度敏感性对水盐变化的响应,较少考虑滨海湿地土壤碳排放的盐度敏感性和湿度敏感性,以及水盐-温度对滨海湿地土壤有机碳矿化分解的协同影响作用,特别是地下水位波动、盐分和温度的协同作用机制尚不清晰。

2.2 滨海湿地土壤碳排放的研究方法 根据陆地生态系统温室气体排放(或吸收)特征和大气中气体传输机制,发展了多种碳排放通量的观测方法,目前已经应用于滨海湿地生态系统的野外土壤碳通量监测方法主要包括静态箱法、动态封闭室法和涡度相关技术等。

1) 静态箱-气相色谱法(static chamber-gas chromatograph)。根据采样需求,使用 PVC 板材或有

机玻璃设计一定规格的静态箱(暗箱)。在30~60 min内,等时间间隔采集静态箱内气体,采集的气体带回实验室,使用气相色谱仪分析气体含量,并按照相应公式计算碳排放通量^[89]。静态箱法是一种较简单的通量测量方法,可用于不同水盐梯度下的温室气体排放监测^[90]。但是,该方法的缺点在于静态箱改变了空气的自然湍流状态,同时箱内的温度、湿度和气压均会随时间延长而变化,导致估算的通量会偏离实际情况^[91]。

2) 动态封闭室法(dynamic closed chamber)。借助于OEM Gascard[®] NG(英国爱丁堡)或LI-COR 8100/8150、LI-7810(美国,LI-COR公司)、LGR温室气体分析仪等仪器进行定位观测。这些仪器多为红外气体分析仪,配有单个或多个测量室(chamber),通过设置时间参数,在一定时间内自动测定CO₂或CH₄排放量,可以满足动态监测需求,目前在滨海湿地CO₂和CH₄排放通量定点研究中已被广泛应用。同时,仪器自带的温度和水分探针可以同步监测土壤温度和水分^[92-93],用于分析水分和温度对土壤碳通量的影响,但缺点是只适用于小尺度点位研究,在较大的时空尺度研究中具有明显不足。

3) 涡度相关技术(eddy covariance technique)。涡度相关技术利用微气象原理估算垂直风速与物质或能量脉动的协方差,可以直接测量植被冠层与大气间能量与物质交换通量,估算生态系统的净交换量^[94]。该技术已经发展成为国际通用的通量观测标准方法,应用于滨海湿地生态系统的碳循环研究中,并建立了不同尺度的通量观测网络^[94]。与传统的通量观测方法相比,涡度相关技术不仅可以在时间尺度和空间尺度上获得大空间、长时间的高质量分辨率的通量数据^[82-83],而且可以捕捉完整的温室气体通量的动态过程,避免由于突发情况(气候、潮汐)的短暂性和瞬时性而错过温室气体排放峰值。

国内外在研究水盐变化对土壤碳排放的影响机制时多采用室内连续密闭培养法,主要包括:①密闭培养-碱液吸收法。培养瓶敞口放置于恒温培养箱中,测定CO₂排放量时,将培养瓶密闭并连接装有0.1 mol·L⁻¹的NaOH碱液的装置,24 h后取出碱液并用BaCl₂溶液滴定,计算CO₂排放量^[77, 95]。②密闭培养-气相色谱法。用注射器从培养瓶内抽取气体后,用气相色谱仪测定。每次采集气体后用N₂冲洗培养瓶,借助注射器平衡培养瓶内外气压,然后继续密闭培养^[69, 86]。③红外线气体分析法。培养瓶敞口,测定CO₂排放时密闭瓶口测量,然后将密闭的培养瓶继续培养,一定时间后取出,进行第二次测量,2次测量之差即为该时间段内的CO₂排放量^[65, 96]。测定时,密闭10 min,每隔1

min测定1次^[73]。室内培养实验用土可采用鲜土或风干土,预培养时间设定为0~14 d,正式培养时间为8~360 d。根据不同研究目的,可以在培养土中添加秸秆等碳源。水分条件通常控制在30%~100%最大持水量或淹水范围内,添加的盐分多以NaCl和人工海盐为主。但当前许多研究中尚未严格控制培养中的好氧/厌氧状态,尽管有的研究模拟了好氧条件,但并没有严格控制瓶内的O₂可利用性,所以培养瓶中并不是严格意义上的好氧状态^[69];也有研究通过向培养瓶内通入N₂,严格考虑控制培养瓶中的厌氧状态^[86, 97],但是N₂的通入可能会通过影响土壤固氮菌等微生物而影响碳排放的估算量。当前土壤碳排放研究方法受制于仪器设备的精度,需要借助稳定同位素¹³C示踪方法开展精细化机制研究。

3 水盐变化下滨海湿地土壤有机碳分解的微生物驱动机制

土壤微生物是驱动元素生物地球化学循环过程的引擎^[98]。细菌和真菌作为重要的分解者,其相对丰度变化可以反映有机质分解和碳捕获过程的变化^[99]。微生物量、土壤呼吸、微生物代谢熵($q(\text{CO}_2)$)、微生物碳利用效率、酶活性等是用来表征微生物活性的常用指标^[33]。淹水条件下土壤微生物活性受到O₂限制,有机碳分解速率降低;同时,缺O₂环境也不利于植物生长,植物凋落物和根系分泌物减少,从而减少了微生物的可利用碳源^[100]。在受盐胁迫影响的土壤中,由于盐分对微生物的不利影响以及低有机质输入,土壤微生物量一般较低^[101]。随着土壤盐度的升高,土壤微生物量占土壤有机质的比例下降,微生物活性降低,土壤盐度与微生物群落丰度总体上呈负相关关系^[102]。

水盐变化能够改变土壤微生物的群落结构,进而调控土壤有机碳的分解与累积(图1)。由于细菌受制于稳定的水分条件,水分缺乏会导致细菌与真菌的丰度比例发生变化^[103]。水分通过影响微生物活性和群落结构进而作用于土壤有机碳的分解过程^[69]。Ren等^[104]研究发现,高水位下细菌群落的多样性和均匀度均处于较高水平,真菌群落则呈现相反特征。然而,也有研究发现,生态补水显著提升了芦苇群落下土壤中微生物的生物量,其中以真菌最为显著^[105]。土壤盐分对微生物的渗透胁迫和毒性效应导致微生物的群落结构与功能发生变化^[98]。例如,盐分变化导致的土壤渗透压变化可以对土壤微生物形成“环境滤过效应”,影响土壤有机碳的分解和微生物残体碳的累积过程^[76]。低盐度条件下,盐度与细菌的相对丰度呈正相关关系^[76],

但与微生物熵无显著性关系^[33]。在 $0\sim 2\times 10^{-3}$ 土壤盐度范围内, 盐分升高增强了碳降解胞外酶的活性并提高了细菌相对丰度, 表明在低盐湿地, 提高盐度可以促进微生物对碳的分解速率, 而盐度对碳分解的促进可能与盐度对细菌群落的影响有关^[76]。过高的盐离子强度则会造成微生物渗透胁迫效应, 干扰细胞功能和繁殖, 甚至造成微生物细胞溶解^[91]。Yang 等^[83]的研究也发现在低盐度范围内, 盐度对微生物的影响可能呈现正效应, 但高盐胁迫可致使微生物生物量及其基础代谢活性下降。不同种类的盐基离子对微生物群落的影响程度不同, 高盐度对土壤微生物的抑制作用是通过负向的渗透势和特定离子的毒性作用实现的^[106]。同等离子强度下, SO_4^{2-} 对湿地土壤呼吸的抑制作用低于 Cl^- ^[106], 其原因在于 SO_4^{2-} 对微生物的毒性比 Cl^- 弱^[107]。

淹水与高盐的协同胁迫, 则通过影响根系细胞膜的选择透过性限制了养分向土壤的输送和土壤微生物的生长^[83]。淡水恢复措施可以缓解盐度对微生物的胁迫作用, 提高滨海湿地土壤微生物量并改变微生物的群落结构, 促进土壤有机碳的累积^[108]。随着水分的变化, 盐分对土壤有机碳分解的影响主要是通过改变微生物的群落结构来实现, 而与微生物的生物量无关^[7]。在数周的时间尺度上, 相比于微生物群落结构的变化, 微生物的代谢活性在调控有机碳矿化过程中发挥了更重要的作用^[109]。从淡水沼泽到盐沼湿地中, 大多数参与有机碳降解的微生物功能基因丰度与盐度呈负相关关系^[110]。淡水沼泽湿地土壤的产 CH_4 菌群落丰度高于咸水沼泽湿地, 这直接导致了亚热带河口湿地 CH_4 排放量差异显著^[111]。与细菌相比, 真菌对盐分具有更高的耐受度^[106]。综上, 以往研究多关注滨海湿地土壤微生物群落结构、多样性特征与水盐变化的关系, 较少考虑水盐变化条件下碳、氮、磷和硫等生源要素循环功能微生物之间的耦合作用关系。

4 结论与展望

滨海湿地的碳循环过程及其对全球碳循环的贡献, 一直是全球变化生态研究的难点与热点。在双碳目标下, 滨海蓝碳生态系统的碳汇功能备受关注。目前国内外学者已在滨海湿地碳储量估算、碳排放规律和微生物的驱动机制等方面取得了一定的研究成果, 但在高强度人类活动和气候变化的双重胁迫下, 滨海湿地土壤有机碳分解和累积的水盐驱动机制尚不完全清晰。因此, 为实现滨海湿地蓝碳增汇和助力碳中和目标的实现, 未来滨海湿地蓝碳生态系统研究亟需深入开展以下几个方面的工作。

1) 滨海湿地土壤有机碳分解的温度、湿度和盐度敏感性及其水盐-温度的协同作用机制。气候变暖能够增加微生物活性, 增强土壤呼吸作用; 而海平面上升所带来的水盐变化, 特别是地下水位波动和盐度变化对滨海湿地土壤有机碳分解过程的协同作用, 尚需开展深化研究。同时, 来水来沙量减少导致的滨海湿地侵蚀过程加剧, 也是土壤有机碳库损失的一个潜在途径。未来在关注滨海湿地土壤碳排放温度敏感性基础上, 还应深入剖析水-沙-盐影响下滨海湿地碳汇功能转化, 以及土壤有机碳分解的盐度敏感性和湿度敏感性的响应特征。

2) 氮磷输入和多重污染胁迫对滨海湿地土壤有机碳排放的影响机制。水盐变化条件下, 生态化学计量比变化将改变营养限制条件, 制约微生物的活性, 通过激发效应影响土壤有机碳的分解和累积过程。以碳氮磷耦合为切入点, 将生态化学计量学理论引入滨海湿地土壤有机碳分解对碳氮磷输入的响应研究中, 有助于深入剖析氮磷限制对滨海湿地土壤有机碳排放的影响机制。同时, 高强度人类活动带来的微塑料以及有机污染物等多重污染胁迫对滨海湿地土壤有机碳分解过程的影响, 也应是未来关注的重点。

3) 滨海湿地土壤微生物碳代谢过程与氮磷硫代谢过程的耦合作用及其水盐驱动机制。考虑水盐变化条件下微生物残体积累对土壤碳库动态变化的贡献及其对土壤有机碳分解过程的影响, 利用宏基因组和宏转录组等多组学技术联合探究微生物碳代谢过程的微观影响机制十分有必要。同时, 借助稳定同位素示踪技术, 关注水盐变化下土壤微生物对碳源的获取, 重点剖析湿地土壤微生物碳代谢相关的关键功能基因表达和关键酶活性变化及其与氮、磷、硫代谢相关功能基因的耦合作用, 为滨海湿地蓝碳增汇提供重要的理论依据。

5 参考文献

- [1] WANG X T, JIANG Z X, LI Y, et al. Inorganic carbon sequestration and its mechanism of coastal saline-alkali wetlands in Jiaozhou Bay, China[J]. *Geoderma*, 2019, 351: 221
- [2] WEBSTER G, O'SULLIVAN L A, MENG Y Y, et al. Archaeal community diversity and abundance changes along a natural salinity gradient in estuarine sediments[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2015, 91(2): 1
- [3] 骆梦, 王青, 邱冬冬, 等. 黄河三角洲典型潮沟系统水文连通特征及其生态效应[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(1): 17

- [4] CHAMBERS L G, DAVIS S E, TROXLER T, et al. Biogeochemical effects of simulated sea level rise on carbon loss in an everglades mangrove peat soil[J]. *Hydrobiologia*, 2014, 726(1): 195
- [5] CHEN Q F, GUO B B, ZHAO C S, et al. Characteristics of CH₄ and CO₂ emissions and influence of water and salinity in the Yellow River delta wetland, China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 239: 289
- [6] AUFFRET M D, KARHU K, KHACHANE A, et al. The role of microbial community composition in controlling soil respiration responses to temperature[J]. *PLoS One*, 2016, 11(10): e0165448
- [7] WEN Y L, BERNHARDT E S, DENG W B, et al. Salt effects on carbon mineralization in southeastern coastal wetland soils of the United States[J]. *Geoderma*, 2019, 339: 31
- [8] MCLEOD E, CHMURA G L, BOUILLON S, et al. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(10): 552
- [9] SUTTON-GRIER A, HOWARD J. Coastal wetlands are the best marine carbon sink for climate mitigation[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2018, 16(2): 73
- [10] BERTRAM C, QUAAS M, REUSCH T B H, et al. The blue carbon wealth of nations[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(8): 704
- [11] HAYWOOD B J, HAYES M P, WHITE J R, et al. Potential fate of wetland soil carbon in a deltaic coastal wetland subjected to high relative sea level rise[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 135185
- [12] LIN Q Y, YU S. Losses of natural coastal wetlands by land conversion and ecological degradation in the urbanizing Chinese coast[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 15046
- [13] YAN J F, QIAN L W, FU X H, et al. Conversion behaviors of litter-derived organic carbon of two halophytes in soil and their influence on SOC stabilization of wetland in the Yangtze River Estuary[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 137109
- [14] CHAMBERS L G, OSBORNE T Z, REDDY K R. Effect of salinity-altering pulsing events on soil organic carbon loss along an intertidal wetland gradient: a laboratory experiment[J]. *Biogeochemistry*, 2013, 115(1/2/3): 363
- [15] DELAUNE R D, WHITE J R. Will coastal wetlands continue to sequester carbon in response to an increase in global sea level? a case study of the rapidly subsiding Mississippi River Deltaic Plain[J]. *Climatic Change*, 2012, 110(1/2): 297
- [16] BAUSTIAN M M, STAGG C L, PERRY C L, et al. Relationships between salinity and short-term soil carbon accumulation rates from marsh types across a landscape in the Mississippi River Delta[J]. *Wetlands*, 2017, 37(2): 313
- [17] MUELLER P, JENSEN K, MEGONIGAL J P. Plants mediate soil organic matter decomposition in response to sea level rise[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(1): 404
- [18] SIMON M R, ZOGG G P, TRAVIS S E. Impacts of sea-level rise on sediment microbial community structure and function in two New England salt marshes, USA[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(12): 2847
- [19] MUDD S M, HOWELL S M, MORRIS J T. Impact of dynamic feedbacks between sedimentation, sea-level rise, and biomass production on near-surface marsh stratigraphy and carbon accumulation[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 82(3): 377
- [20] 贾佳, 白军红, 高照琴, 等. 黄河三角洲潮间带盐沼土壤碳、氮含量和储量[J]. *湿地科学*, 2015, 13(6): 714
- [21] 严格, 葛振鸣, 张利权. 崇明东滩湿地不同盐沼植物群落土壤碳储量分布[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1): 85
- [22] ZHANG G L, BAI J H, ZHAO Q Q, et al. Soil carbon storage and carbon sources under different *Spartina alterniflora* invasion periods in a salt marsh ecosystem[J]. *Catena*, 2021, 196: 104831
- [23] BAI J H, WANG J J, YAN D H, et al. Spatial and temporal distributions of soil organic carbon and total nitrogen in two marsh wetlands with different flooding frequencies of the Yellow River Delta, China[J]. *Clean Soil Air Water*, 2012, 40(10): 1137
- [24] LUO M, HUANG J F, ZHU W F, et al. Impacts of increasing salinity and inundation on rates and pathways of organic carbon mineralization in tidal wetlands: a review[J]. *Hydrobiologia*, 2019, 827(1): 31
- [25] CHAPMAN S K, HAYES M A, KELLY B, et al. Exploring the oxygen sensitivity of wetland soil carbon mineralization[J]. *Biology Letters*, 2019, 15(1): 20180407
- [26] HAN G X, CHU X J, XING Q H, et al. Effects of episodic flooding on the net ecosystem CO₂ exchange of a supratidal wetland in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(8): 1506
- [27] 曹磊, 宋金明, 李学刚, 等. 滨海盐沼湿地有机碳的沉积与埋藏研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(7): 2040
- [28] FENG Y J, YANG J S, ZHENG J H. Correlation between soil water retention capability and soil salt content[J]. *Pedosphere*, 2000, 10(3): 275
- [29] WONG V N L, DALAL R C, GREENE R S B. Carbon

- dynamics of sodic and saline soils following gypsum and organic material additions: a laboratory incubation[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41(1): 29
- [30] LU Q Q, BAI J H, ZHANG G L, et al. Spatial and seasonal distribution of carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur and their ecological stoichiometry in wetland soils along a water and salt gradient in the Yellow River Delta, China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2018, 104: 9
- [31] ZHAO Q Q, BAI J H, ZHANG G L, et al. Effects of water and salinity regulation measures on soil carbon sequestration in coastal wetlands of the Yellow River Delta[J]. *Geoderma*, 2018, 319: 219
- [32] SETIA R, GOTTSCHALK P, SMITH P, et al. Soil salinity decreases global soil organic carbon stocks[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 465: 267
- [33] RATH K M, ROUSK J. Salt effects on the soil microbial decomposer community and their role in organic carbon cycling: a review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 81: 108
- [34] MAVI M S, SANDERMAN J, CHITTLEBOROUGH D J, et al. Sorption of dissolved organic matter in salt-affected soils: effect of salinity, sodicity and texture[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 435/436: 337
- [35] HERBERT E R, BOON P, BURGIN A J, et al. A global perspective on wetland salinization: ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands[J]. *Ecosphere*, 2015, 6(10): 206
- [36] 杜书栋, 白军红, 贾佳, 等. 黄河三角洲芦苇湿地土壤有机碳储量沿盐分梯度的变化特征[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(1): 80
- [37] SERRANO O, LAVERY P S, DUARTE C M, et al. Can mud (silt and clay) concentration be used to predict soil organic carbon content within seagrass ecosystems?[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(17): 4915
- [38] ZHAO Q Q, BAI J H, LIU P P, et al. Decomposition and carbon and nitrogen dynamics of *Phragmites australis* litter as affected by flooding periods in coastal wetlands[J]. *Clean Soil Air Water*, 2015, 43(3): 441
- [39] 金宝石, 闫鸿远, 张林海, 等. 中国滨海互花米草湿地土壤有机碳时空变化及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(12): 2021
- [40] WONG V N L, GREENE R S B, DALAL R C, et al. Soil carbon dynamics in saline and sodic soils: a review[J]. *Soil Use and Management*, 2010, 26(1): 2
- [41] DANG D M, MACDONALD B, WARNEKE S, et al. Available carbon and nitrate increase greenhouse gas emissions from soils affected by salinity[J]. *Soil Research*, 2017, 55(1): 47
- [42] NOURI H, CHAVOSHI BORUJENI S, NIROLA R, et al. Application of green remediation on soil salinity treatment: a review on halophytoremediation[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, 107: 94
- [43] 韩玲, 白军红, 叶晓飞, 等. 淡水恢复对黄河口盐沼湿地土壤水盐信息的影响[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(1): 42
- [44] 裴俊, 杨薇, 王文燕. 淡水恢复工程对黄河三角洲湿地生态系统服务的影响[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(1): 104
- [45] 王维奇, 王纯, 全川, 等. 闽江河口区盐-淡水梯度下芦苇沼泽土壤有机碳特征[J]. *湿地科学*, 2012, 10(2): 164
- [46] DU S D, BAI J H, ZHAO Q Q, et al. Deposition flux, stocks of C, N, P, S, and their ecological stoichiometry in coastal wetlands with three plant covers[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022: 10
- [47] GUAN Y N, BAI J H, WANG J J, et al. Effects of groundwater tables and salinity levels on soil organic carbon and total nitrogen accumulation in coastal wetlands with different plant cover types in a Chinese estuary[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 106969
- [48] HUANG L B, ZHANG G L, BAI J H, et al. Desalinization via freshwater restoration highly improved microbial diversity, co-occurrence patterns and functions in coastal wetland soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 765: 142769
- [49] ZHAO Q Q, BAI J H, WANG X, et al. Soil organic carbon content and stock in wetlands with different hydrologic conditions in the Yellow River Delta, China[J]. *Ecology & Hydrobiology*, 2020, 20(4): 537
- [50] YU L, ZHUANG T, BAI J H, et al. Effects of water and salinity on soil labile organic carbon in estuarine wetlands of the Yellow River Delta, China[J]. *Ecology & Hydrobiology*, 2020, 20(4): 556
- [51] HUO L, PANG H C, ZHAO Y G, et al. Buried straw layer plus plastic mulching improves soil organic carbon fractions in an arid saline soil from Northwest China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 286
- [52] YANG J S, ZHAN C, LI Y Z, et al. Effect of salinity on soil respiration in relation to dissolved organic carbon and microbial characteristics of a wetland in the Liaohe River estuary, Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 946
- [53] 赵海晓, 高永超, 赵庆庆, 等. 不同水文条件下黄河三角洲湿地土壤溶解性有机碳的分布特征[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(1): 51
- [54] SULLIVAN B W, SELMANTS P C, HART S C. Does dissolved organic carbon regulate biological methane oxidation in semiarid soils?[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(7): 2149

- [55] HU X, SUN Z. Effects of exogenous nitrogen import on variations of nutrient in decomposing litters of *Suaeda salsa* in coastal marsh of the Yellow River estuary, China[J/OL]. *Environmental Science and Pollution Research International* (2021-02-26)[2022-04-10]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33634408/>
- [56] LIU M, ZHANG Z J, HE Q, et al. Exogenous phosphorus inputs alter complexity of soil-dissolved organic carbon in agricultural riparian wetlands[J]. *Chemosphere*, 2014, 95: 572
- [57] RILLIG M C, LEIFHEIT E, LEHMANN J. Microplastic effects on carbon cycling processes in soils[J]. *PLoS Biology*, 2021, 19(3): e3001130
- [58] LUO J, CHEN Y C, WU Y H, et al. Temporal-spatial variation and controls of soil respiration in different primary succession stages on glacier forehead in Gongga Mountain, China[J]. *PLoS One*, 2012, 7(8): e42354
- [59] KANE E S, CHIVERS M R, TURETSKY M R, et al. Response of anaerobic carbon cycling to water table manipulation in an Alaskan rich fen[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 50
- [60] 汪旭明, 任洪昌, 全川. 盐度对河口潮汐湿地温室气体产生和排放的影响研究进展[J]. *湿地科学*, 2014, 12(6): 814
- [61] YIN S, BAI J H, WANG W, et al. Effects of soil moisture on carbon mineralization in floodplain wetlands with different flooding frequencies[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 1074
- [62] HAN G X, SUN B Y, CHU X J, et al. Precipitation events reduce soil respiration in a coastal wetland based on four-year continuous field measurements[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256/257: 292
- [63] DINSMORE K J, SKIBA U M, BILLETT M F, et al. Effect of water table on greenhouse gas emissions from peatland mesocosms[J]. *Plant and Soil*, 2008, 318(1/2): 229
- [64] ELBERLING B, ASKAER L, JØRGENSEN C J, et al. Linking soil O₂, CO₂, and CH₄ concentrations in a wetland soil: implications for CO₂ and CH₄ fluxes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(8): 3393
- [65] SETIA R, SMITH P, MARSCHNER P, et al. Introducing a decomposition rate modifier in the Rothamsted Carbon Model to predict soil organic carbon stocks in saline soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(15): 6396
- [66] MACREADIE P I, NIELSEN D A, KELLEWAY J J, et al. Can we manage coastal ecosystems to sequester more blue carbon?[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2017, 15(4): 206
- [67] ERWIN K L. Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2008, 17(1): 71
- [68] SAHRAWAT K L. Organic matter accumulation in submerged soils[J]. *Advances in Agronomy*, 2004, 81(3): 169
- [69] 张敬智, 马超, 郜红建. 淹水和好气条件下东北稻田黑土有机碳矿化和微生物群落演变规律[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(6): 1160
- [70] CUI H, BAI J H, DU S D, et al. Interactive effects of groundwater level and salinity on soil respiration in coastal wetlands of a Chinese delta[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 286: 117400
- [71] HU M J, REN H C, REN P, et al. Response of gaseous carbon emissions to low-level salinity increase in tidal marsh ecosystem of the Min River estuary, Southeastern China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 52: 210
- [72] WILSON B J, MORTAZAVI B, KIENE R P. Spatial and temporal variability in carbon dioxide and methane exchange at three coastal marshes along a salinity gradient in a northern Gulf of Mexico estuary[J]. *Biogeochemistry*, 2015, 123(3): 329
- [73] WESTON N B, VILE M A, NEUBAUER S C, et al. Accelerated microbial organic matter mineralization following salt-water intrusion into tidal freshwater marsh soils[J]. *Biogeochemistry*, 2011, 102(1/2/3): 135
- [74] WESTON N B, DIXON R E, JOYE S B. Ramifications of increased salinity in tidal freshwater sediments: Geochemistry and microbial pathways of organic matter mineralization[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2006, 111(G1): G01009
- [75] WANG F M, KROEGER K D, GONNEEA M E, et al. Water salinity and inundation control soil carbon decomposition during salt marsh restoration: an incubation experiment[J]. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(4): 1911
- [76] MORRISSEY E M, GILLESPIE J L, MORINA J C, et al. Salinity affects microbial activity and soil organic matter content in tidal wetlands[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(4): 1351
- [77] 肖颖, 杨继松. 辽河口滨海湿地土壤有机碳矿化及其与盐分的关系[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(10): 2792
- [78] YOU C, JIA C X, PAN G. Effect of salinity and sediment characteristics on the sorption and desorption of perfluorooctane sulfonate at sediment-water interface[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1343
- [79] CHAMBERS L G, REDDY K R, OSBORNE T Z. Short-term response of carbon cycling to salinity pulses in a freshwater wetland[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(5): 2000
- [80] CHMURA G L, ANISFELD S C, CAHOON D R, et al.

- Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 1111
- [81] MARTON J M, HERBERT E R, CRAFT C B. Effects of salinity on denitrification and greenhouse gas production from laboratory-incubated tidal forest soils[J]. *Wetlands*, 2012, 32(2): 347
- [82] LIU X J, RUECKER A, SONG B, et al. Effects of salinity and wet-dry treatments on C and N dynamics in coastal-forested wetland soils: implications of sea level rise[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 112: 56
- [83] YANG J S, LIU J S, HU X J, et al. Effect of water table level on CO₂, CH₄ and N₂O emissions in a freshwater marsh of Northeast China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 61: 52
- [84] XIE X, ZHANG M Q, ZHAO B, et al. Dependence of coastal wetland ecosystem respiration on temperature and tides: a temporal perspective[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(3): 539
- [85] DASH P K, BHATTACHARYYA P, ROY K S, et al. Environmental constraints' sensitivity of soil organic carbon decomposition to temperature, management practices and climate change[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 107: 105644
- [86] LIU Y, YANG J S, NING K, et al. Temperature sensitivity of anaerobic CO₂ production in soils of *Phragmites australis* marshes with distinct hydrological characteristics in the Yellow River estuary[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 124: 107409
- [87] CHEN X, LUO M, TAN J, et al. Salt-tolerant plant moderates the effect of salinity on soil organic carbon mineralization in a subtropical tidal wetland[J/OL]. *Science of the Total Environment* (2022-05-10)[2022-05-20]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35561913/>
- [88] ZHOU X H, XU X, ZHOU G Y, et al. Temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition increased with mean carbon residence time: field incubation and data assimilation[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(2): 810
- [89] WHITTAKER C, YATES N E, POWERS S J, et al. Testing the use of static chamber boxes to monitor greenhouse gas emissions from wood chip storage heaps[J]. *BioEnergy Research*, 2017, 10(2): 353
- [90] 袁晓敏, 杨继松, 刘凯, 等. 辽河口滨海湿地CH₄排放特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2019, 39(5): 1829
- [91] 姚晓, 李哲, 郭劲松, 等. 水-气界面CO₂通量监测的静态箱法与薄边界层模型估算法比较[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(2): 289
- [92] BRØHOLT A, LARSEN K S, IBROM A, et al. High-frequency observations of the isotopic composition of soil, stem and root respiration in a Danish Beech forest[C]// 2nd ICOS Science Conference on greenhouse gases and biogeochemical cycles, Helsinki, Finland. Copenhagen: DTU, 2016
- [93] LOGNOUL M, THEODORAKOPOULOS N, HIEL M P, et al. Impact of tillage on greenhouse gas emissions by an agricultural crop and dynamics of N₂O fluxes: insights from automated closed chamber measurements[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 167: 80
- [94] 陈世苹, 游翠海, 胡中民, 等. 涡度相关技术及其在陆地生态系统通量研究中的应用[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(4): 291
- [95] 杨继松, 刘景双, 孙丽娜. 温度、水分对湿地土壤有机碳矿化的影响[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(1): 38
- [96] SETIA R, MARSCHNER P, BALDOCK J, et al. Is CO₂ evolution in saline soils affected by an osmotic effect and calcium carbonate?[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(8): 781
- [97] WANG C, TONG C, CHAMBERS L G, et al. Identifying the salinity thresholds that impact greenhouse gas production in subtropical tidal freshwater marsh soils[J]. *Wetlands*, 2017, 37(3): 559
- [98] MORILLAS L, DURÁN J, RODRÍGUEZ A, et al. Nitrogen supply modulates the effect of changes in drying-rewetting frequency on soil C and N cycling and greenhouse gas exchange[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(10): 3854
- [99] WARING B G, AVERILL C, HAWKES C V. Differences in fungal and bacterial physiology alter soil carbon and nitrogen cycling: insights from meta-analysis and theoretical models[J]. *Ecology Letters*, 2013, 16(7): 887
- [100] BOYRAHMADI M, RAIESI F. Plant roots and species moderate the salinity effect on microbial respiration, biomass, and enzyme activities in a sandy clay soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54(4): 509
- [101] HU M J, PEÑUELAS J, SARDANS J, et al. Shifts in microbial biomass C/N/P stoichiometry and bacterial community composition in subtropical estuarine tidal marshes along a gradient of freshwater-oligohaline water[J]. *Ecosystems*, 2020, 23(6): 1265
- [102] ZHAO Q Q, BAI J H, GAO Y C, et al. Shifts in the soil bacterial community along a salinity gradient in the Yellow River Delta[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(16): 2255
- [103] GUHR A, MARZINI C, BORKEN W, et al. Effect of water redistribution by two distinct saprotrophic fungi on carbon mineralization and nitrogen translocation in dry soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 103: 380
- [104] REN Q, YUAN J H, WANG J P, et al. Water level has

- higher influence on soil organic carbon and microbial community in Poyang Lake wetland than vegetation type[J]. *Microorganisms*, 2022, 10(1): 131
- [105] 陈静潇, 马梓文, 肖蓉, 等. 生态补水对黄河三角洲盐沼地土壤微生物群落分布特征的影响[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(1): 32
- [106] RATH K M, MAHESHWARI A, BENGTON P, et al. Comparative toxicities of salts on microbial processes in soil[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2016, 82(7): 2012
- [107] SINDHU M A, CORNFIELD A H. Comparative effects of varying levels of chlorides and sulphates of sodium, potassium, calcium, and magnesium on ammonification and nitrification during incubation of soil[J]. *Plant and Soil*, 1967, 27(3): 468
- [108] MA Z W, ZHANG M X, XIAO R, et al. Changes in soil microbial biomass and community composition in coastal wetlands affected by restoration projects in a Chinese delta[J]. *Geoderma*, 2017, 289: 124
- [109] EDMONDS J W, WESTON N B, JOYE S B, et al. Microbial community response to seawater amendment in low-salinity tidal sediments[J]. *Microbial Ecology*, 2009, 58(3): 558
- [110] ZHANG G L, BAI J H, TEBBE C C, et al. Salinity controls soil microbial community structure and function in coastal estuarine wetlands[J]. *Environmental Microbiology*, 2021, 23(2): 1020
- [111] TONG C, CADILLO-QUIROZ H, ZENG Z H, et al. Changes of community structure and abundance of methanogens in soils along a freshwater-brackish water gradient in subtropical estuarine marshes[J]. *Geoderma*, 2017, 299: 101

Soil organic carbon accumulation and decomposition in coastal wetlands in the changing water and salinity conditions: a review

BAI Junhong LIU Yue ZHAO Qingqing WANG Junjing ZHANG Guangliang
CHEN Guozhu LIU Zhe

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract Coastal wetlands are an important component of blue carbon ecosystems, have great potential for carbon capture and storage, and play a significant role in mitigating climate warming. Soil organic carbon accumulation and decomposition can change greatly along a hydrological and salinity gradient in coastal wetlands. This review summarized the progresses on the soil organic carbon accumulation, carbon emission, microbial mechanisms of soil organic carbon decomposition and the methodology of carbon fluxes in coastal wetlands in a changing water and salinity environment. Finally, the future key researches on the soil organic carbon processes in coastal wetlands under different water and salinity should focus on these following aspects, including (1) the temperature, moisture and salinity sensitivities of soil organic carbon mineralization in coastal wetlands and integrated influencing mechanisms of water, salinity and temperature, (2) the influencing mechanisms of nitrogen and phosphorus inputs and multi-pollutant stresses on soil organic carbon decomposition and carbon emissions from coastal wetlands, and (3) the coupling of microbial carbon metabolism and nitrogen, phosphorus and sulfur metabolisms and the driving mechanisms of water and salinity. This review can provide a scientific and theoretical basis for revealing the influencing mechanisms of changing water and salt conditions on carbon cycle of coastal wetlands, and for evaluating the improvement and management of carbon sink function of coastal wetlands in context to climate change.

Keywords changing water and salinity conditions; soil organic carbon accumulation; carbon fluxes; microbial decomposition; coastal wetlands

【责任编辑: 武 佳】