

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0543

高灯州, 曾从盛, 章文龙, 等. 2016. 水淹频率增加对闽江口湿地土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 环境科学学报, 36(3): 974-980

Gao D Z, Zeng C S, Zhang W L, et al. 2016. Effects of increasing flooded frequency on soil organic carbon and its active composition in the Min River estuarine wetland[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(3): 974-980

水淹频率增加对闽江口湿地土壤有机碳及其活性组分的影响

高灯州^{1,3}, 曾从盛^{1,2,3,*}, 章文龙^{1,3}, 刘晴晴¹, 陈依婷¹, 王志萍¹

1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

2. 湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350007

3. 福建师范大学亚热带湿地研究中心, 福州 350007

收稿日期: 2015-05-29

修回日期: 2015-06-30

录用日期: 2015-06-30

摘要: 研究河口湿地土壤有机碳及其活性组分对水淹频率的响应, 对认识海平面上升背景下湿地土壤碳循环具有重要意义. 本文以闽江河口湿地为研究区, 测定了区内 6、7 和 8 月高潮滩(偶尔水淹, H 样地)和中潮滩(频繁水淹, M 样地)表层土壤有机碳(SOC)及其活性组分-微生物生物量碳(MBC)、易氧化有机碳(EOC)及可溶性有机碳(DOC)的含量, 并进一步通过原位培养方法(H 样地植物-土壤移动到 M 样地进行培养)分析了水淹频率增加对 SOC 及其活性组分的影响. 结果表明: H 样地 SOC、EOC、MBC 和 DOC 含量平均值分别为 $45.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $30.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $385.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $749.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总体显著高于而 M 样地 SOC、EOC、MBC 和 DOC 含量 ($p < 0.05$), 高出的比例分别为 161.81%、136.2%、200.6% 和 710.86%; 野外培养 90 d 后, SOC 和 EOC 均无显著变化, 而 MBC 和 DOC 随培养时间延长, 影响逐渐增大, 90 d 培养后, 两者均显著下降, 下降比例分别为 28.21% 和 93.84%; 此外, SOC 及其活性组分在一定程度上受到土壤理化性质的影响, 除 EOC 外, SOC、MBC 和 DOC 均与 pH、TN 和 TP 呈显著相关 ($p < 0.01$). 这些结果表明, 在较长时间尺度, 水淹频率可以直接影响 SOC 及其活性组分, 也可能通过影响 pH、TN 和 TP 等因子, 间接影响 SOC 及其活性组分.

关键词: 水淹频率; 土壤有机碳; 活性组分; 闽江口

文章编号: 0253-2468(2016)03-974-07

中图分类号: X144

文献标识码: A

Effects of increasing flooded frequency on soil organic carbon and its active composition in the Min River estuarine wetland

GAO Dengzhou^{1,3}, ZENG Congsheng^{1,2,3,*}, ZHANG Wenlong^{1,3}, LIU Qingqing¹, CHEN Yiting¹, WANG Zhiping¹

1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007

2. Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fuzhou 350007

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

Received 29 May 2015;

received in revised form 30 June 2015;

accepted 30 June 2015

Abstract: It is important to study the soil organic carbon and its active composition in estuarine wetland for understanding the soil carbon cycle of wetland under sea level rise. Min River estuarine wetland was chosen as the study area, the soil organic carbon (SOC) and its active composition (microbial biomass carbon (MBC), dissolved organic carbon (DOC) and easily oxidized carbon (EOC)) were determined in high tidal flat (occasionally flooded, H plot), middle tidal flat (frequently flooded, M plot). Moreover, the effects of increasing flooded frequency on soil organic carbon and its active composition were also analyzed by using incubation method in situ (plant-soil in H plot move to M plot). The result indicated that the SOC, EOC, MBC and DOC concentrations in H plot were $45.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $30.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $385.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $749.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, which were higher than those of M plot, and the increment were 161.81%, 136.2%, 200.6% and 710.86%, respectively. After 90-day incubation in situ, SOC and EOC concentrations were not obviously changed, while significantly decreased 28.21% and 93.84% for MBC and DOC concentrations, respectively ($p < 0.05$). The SOC and its active composition were partially influenced by soil properties. SOC, MBC and DOC were significant related to pH, TN and TP ($p < 0.01$) except EOC.

基金项目: 国家基础科学人才培养基金(No.J1210067)

Supported by the NSFC for Talents Training in Basic Science(No.J1210067)

作者简介: 高灯州(1990—), 男, E-mail: gaodz0526@163.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: cszeng@fjnu.edu.cn

Biography: GAO Dengzhou (1990—), male, E-mail: gaodz0526@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: cszeng@fjnu.edu.cn

These results indicated that SOC and the active compositions can be influenced directly by the flooded frequency and the indirectly through changing the pH, TN and TP under longer time scale.

Keywords: flooded frequency; soil organic carbon; active composition; Min River

1 引言(Introduction)

河口沼泽湿地生态系统在全球碳平衡和气候变化中发挥着重要作用.河口潮汐作用引起水淹频率和水动力条件的差异对土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)循环转化具有显著影响,海平面上升(FitzGerald *et al.*, 2008)和河口沼泽湿地沉降(Syvitski *et al.*, 2009),使得沼泽湿地陆向迁移,这将改变沼泽湿地淹水频率和水动力条件,进而影响SOC循环转化(Zhong *et al.*, 2011).因此,开展水淹频率对河口沼泽湿地土壤碳循环转化影响的研究具有重要意义.SOC在短期内变化不明显,其短期变化主要发生在易分解、矿化的活性碳部分,土壤活性碳是对外界因素较敏感那部分SOC(Roldán *et al.*, 2011),其中,土壤易氧化有机碳(EOC)、微生物生物量碳(MBC)和可溶性有机碳(DOC)是土壤活性碳库的3个重要表征指标(赵鑫等, 2011).尽管有机碳活性组分占SOC比重较小,但这些组分更敏感,可以表征SOC含量的变化(张国等, 2011).因此,研究水淹频率对SOC活性组分的影响有利于深入认识SOC的特征及其对气候变化导致海平面上升的响应.

目前,已有一些学者对河口沼泽湿地不同水淹频率下SOC进行了研究,发现不同水淹频率下SOC及其活性组分具有显著差异(Poret-Peterson *et al.*, 2007;王红丽等, 2009; Bai *et al.*, 2012;高灯州等, 2014).如Poret-Peterson等(2007)研究发现,沿着水文梯度(从高到低),土壤MBC呈显著增加趋势;而王红丽等(2009)对崇明岛东滩不同潮滩有机碳的研究也表明,有机碳含量从高潮滩到低潮滩呈现降低的趋势;高灯州等(2014)揭示闽江口湿地SOC及其活性组分(EOC、MBC和DOC)沿水文梯度表现为低水淹频率>中水淹频率>高水淹频率.此外,还有报道表明,沿着水文梯度,植物生物量、土壤理化性质(TP、TN、pH、Eh、EC和粒径)等一系列内在相关的生物与非生物因子都发生显著变化,这些因子在不同潮滩存在明显分带(Spohn *et al.*, 2013; Lewis *et al.*, 2014; Luo *et al.*, 2014),且对SOC及其活性组分产生一定的影响.因此,单纯比较不同潮滩或不同水淹频率下SOC及其活性组分含量的差异,并不能

有效揭示水淹频率对SOC及其活性组分的影响及机制.然而当前基于控制水分条件进行SOC及其活性组分的研究多集中在室内(万忠梅等, 2008),因此,很有必要通过野外原位培养实验,探讨SOC及其活性组分对水淹频率的响应.

基于此,本文选取福建省闽江口短叶荳苳(*Cyperus malaccensis* Lam. var. *brevifolius* Bocklr)湿地为研究区,以土壤EOC、MBC和DOC作为表征SOC的动态指标,通过野外原位采样和原位控制培养相结合,探讨闽江口沼泽湿地SOC及其活性组分对水淹频率增加的响应,以期在海平面上升背景下SOC生物地球化学循环提供基础依据.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 研究区概况

闽江口鱗鱼滩湿地(26°00'36"~26°03'42"N, 119°34'12"~119°41'40"E)地处福建省长乐市闽江入海口,是闽江河口面积最大的天然洲滩湿地.该区为南亚热带与中亚热带过渡带,气候暖湿,年均气温19.3℃,气温最高值出现在7—8月.年均降水量约为1380mm,年内降水峰值分别在5月和8月,潮汐属于正规半日潮.土壤为滨海盐土和沙土.区内生物多样性丰富,栖息众多的水禽等鸟类,植被主要有短叶荳苳、芦苇(*Phragmites australis*)和互花米草(*Spartina alterniflora*)等(图1),其中,短叶荳苳在高潮滩和中潮滩均有分布,芦苇主要分布在高潮滩(刘剑秋, 2006).

2.2 研究方法

2.2.1 实验设计与样品采集 在闽江口鱗鱼滩湿地选取典型潮滩,分别在高潮滩和中潮滩布设样地,并将高潮滩和中潮滩样地分别标记为H和M(图1).H和M样地的植被群落相似,主要为短叶荳苳,但其水淹频率存在显著差异,其中,M样地的水淹频率为37.11%,H样地的水淹频率为4.15%.于2014年5月20日,在H处选取短叶荳苳长势相当的样地,挖取18份原状土柱(包括植物和根系),分别装到直径为20cm,高度为15cm花盆中,其中9份在原地进行培养(H),另外9份移动到M样地进行培养(HM).同时,在M处挖取9份原状土柱在原地进行培养(M).在培养后的30d(6月20日)、60d

(7月20日)、90 d(8月20日)进行采样,每种处理采集3个重复.采集时,首先采集每个花盆短叶荇芒地上生物量,然后采集花盆中心部分0~10 cm 土样.一部分鲜土过 2 mm 筛于 4 °C 保存,用于测定土壤

MBC、DOC、含水量;另一部分室内风干,分别过 2 mm 和 0.149 mm 筛用于测定 SOC、EOC 和 pH、电导率(EC)、TN 和 TP 等土壤理化性质.

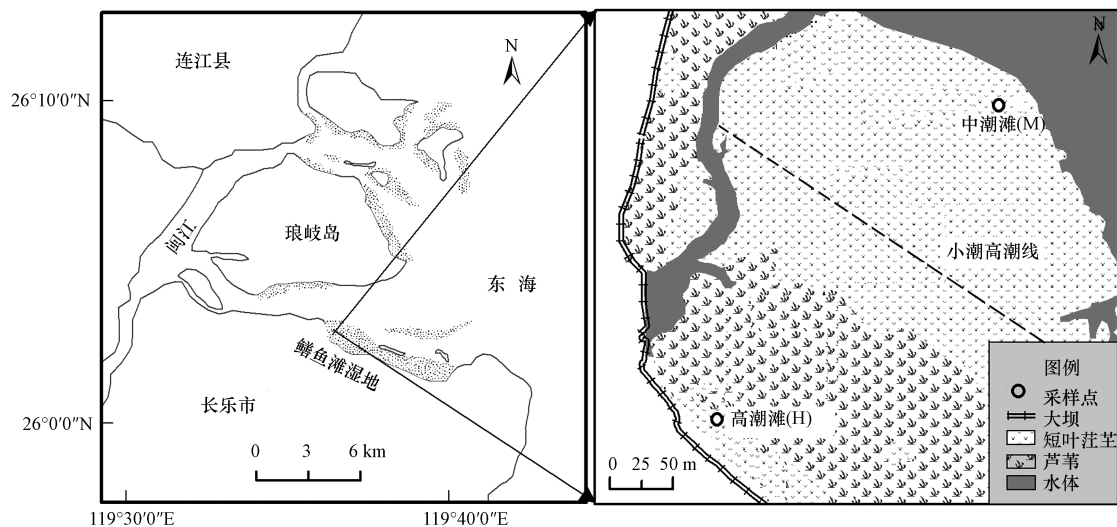


图1 研究区与样地布设图

Fig.1 The study region and map of the sampling sites

2.2.2 SOC 及其活性组分和土壤理化性质的测定

采用重铬酸钾-外加热法测定 SOC 含量;采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提,岛津 TOC-V_{CPH} 仪测定浸提液有机碳浓度,然后采用公式 $M_c = E_c / 0.38$ (M_c 为土壤微生物量碳含量, E_c 为熏蒸和未熏蒸土壤样品中浸提液有机碳含量的差值) 计算 MBC 含量(鲁如坤, 2000); DOC 含量通过去离子水浸提,岛津 TOC-V_{CPH} 仪测定浸提液有机碳浓度(Chantigny, 2003); TN 采用碳氮元素分析仪测定, TP 用硫酸-高氯酸消煮,然后用钼锑抗比色法测定(鲁如坤, 2000);用 333 mol·L⁻¹ 的 KMnO₄ 浸提,通过对比减少的 KMnO₄ 浓度计算 EOC 含量(Blair *et al.*, 1995);采用电位计法(DDS-307 型电导仪和奥立龙 868 型酸度计)测定土壤 EC 和 pH(水土比 5:1),采用烘干法测定土壤含水率(鲁如坤, 2000).

2.2.3 数据处理 采用 Microsoft Excel 2003 对数据进行整理,基于 SPSS 19.0 软件对数据进行处理统计分析,用单因素方差分析法(One-way ANOVA)分析不同水淹频率下 SOC 及其活性组分、土壤理化性质(pH、含水量、EC、TN 和 TP)和植物地上生物量的差异性,以 $p < 0.05$ 为差异显著;用 Person 相关系数表征 SOC 及其活性组分与土壤理化性质之间的相关关系;用主成分分析提取载荷矩阵,分析影响 SOC

及其活性组分的关键环境因子.用 Origin 8.0 制图.

3 结果与分析(Results and analysis)

3.1 水淹频率增加对 SOC 及其活性组分的影响

H 样地和 M 样地 6、7 和 8 月份 SOC 及其活性组分含量如图 2 所示.其中, H 样地 SOC、EOC、MBC 和 DOC 含量平均值分别为 45.11 g·kg⁻¹、30.21 g·kg⁻¹、385.29 mg·kg⁻¹ 和 749.98 mg·kg⁻¹, 而 M 样地 SOC、EOC、MBC 和 DOC 含量平均值分别为 17.23 g·kg⁻¹、12.79 g·kg⁻¹、128.14 mg·kg⁻¹ 和 39.12 mg·kg⁻¹, 总体上看,频繁水淹的 SOC 及其活性组分含量显著低于偶尔水淹的 SOC 及其活性组分含量 ($p < 0.05$).

SOC 及其活性组分对短期增加水淹频率(30~90 d) 的响应不尽相同(图 2). 其中,对于 SOC 和 EOC 而言,在为期 90 d 的培养中,增加水淹对其均无显著影响($p > 0.05$). 而对于 MBC 和 DOC 则随培养时间的延长,其影响逐渐增大.其中, MBC 在 30 d 和 60 d 培养后,增加水淹频率对其影响不显著,而培养 90 d 后,水淹频率增加显著降低了土壤 MBC 含量($p < 0.05$), 下降比例约为 28.21%. 与 MBC 相比, DOC 的变化更为敏感,除在 30 d 增加水淹频率对其影响不显著外, 60 d 和 90 d 培养后,其含量随

水淹频率增加均有显著降低 ($p < 0.05$), 60 d 培养后 DOC 下降比例为 30.27%, 而 90 d 培养后, 下降比例高达 93.84%.

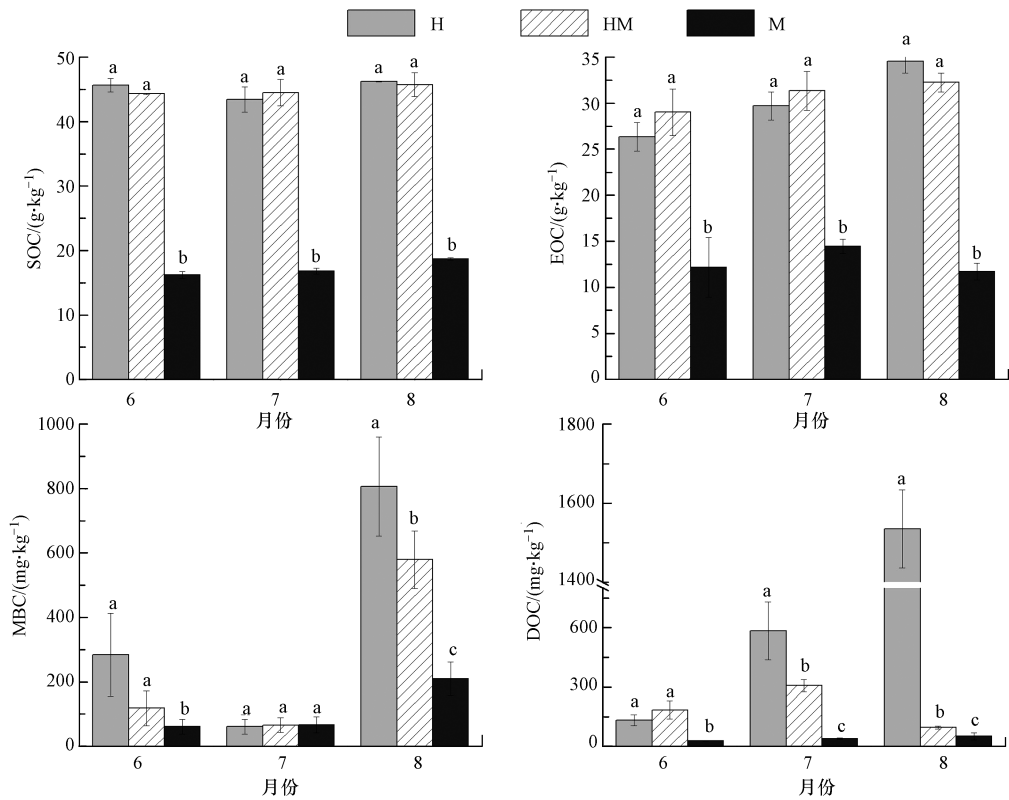


图 2 淹水频率对 SOC 及其活性组分的影响 (H:高潮滩(偶尔水淹), M:中潮滩(频繁水淹), HM:高潮滩植物-土壤移动到中潮滩培养; 6、7 和 8 月分别代表培养 30、60 和 90 d; 不同字母表示相同月份不同水文条件的 SOC 及活性组分的差异显著, 反之差异不显著, 下同)

Fig.2 Effects of flood frequencies on SOC and its active fractions

3.2 水淹频率增加对土壤理化性质和植物地上生物量的影响

水淹频率增加对土壤理化性质和植物地上生物量的影响如图 3 所示, 不同水淹频率下含水量和 EC 的差异没有明显规律; pH 除 6 月份外, 表现为 H 样地显著小于 M 样地 ($p < 0.05$), 而 TN 和 TP

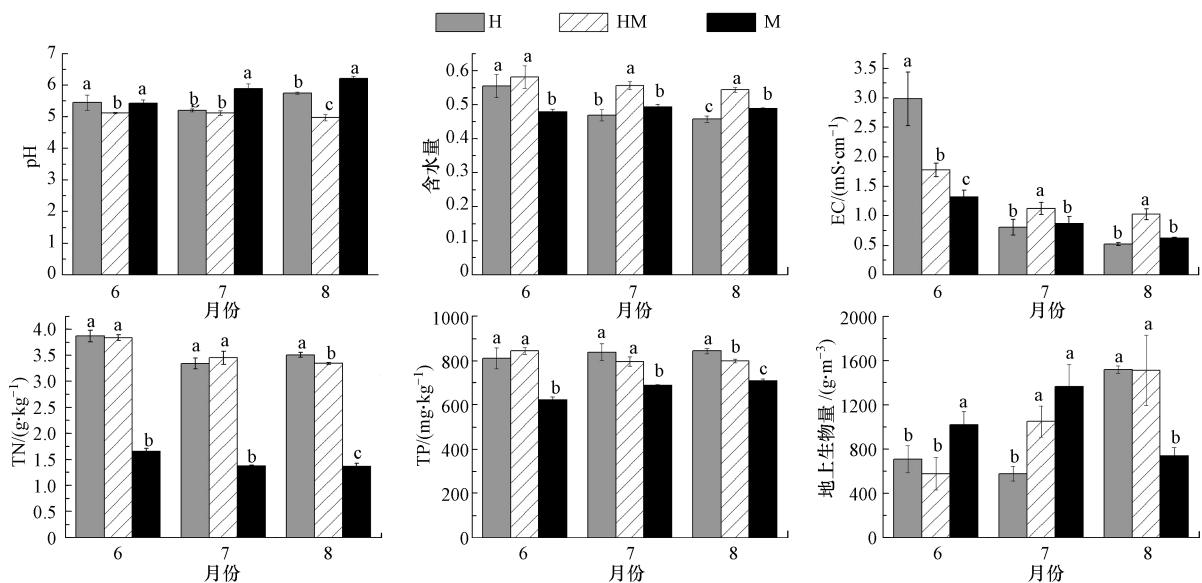


图 3 淹水频率对土壤理化性质及植物地上生物量的影响

Fig.3 Effects of flood frequencies on soil properties and aboveground biomass

均表现为 H 样地显著大于 M 样地 ($p < 0.05$). 植物地上生物量在 6 和 7 月份表现为 M 样地 $>$ H 样地, 8 月份则相反, 表现为 M 样地 $<$ H 样地 ($p < 0.05$).

H 样地植物-土壤移动到 M 样地培养后, 各土壤理化性质的变化也存在一定差异. 其中, 植物地上生物量没有明显变化规律; pH 除 7 月份外, 均表现为显著降低的趋势 ($p < 0.05$); 在培养初期 (30 d), 含水量没有明显变化, EC 则显著降低 ($p < 0.05$), 而在培养中后期 (60 和 90 d), 含水量和 EC 均呈明显升高趋势 ($p < 0.05$); TN 和 TP 在培养的前两个月没有明显变化, 但在培养后期 (90 d) 则显著降低 ($p < 0.05$).

3.3 SOC 及其活性组分与理化性质和植物地上生物量的关系

SOC 及其活性组分与土壤理化性质和植物地上生物量的相关分析结果显示 (表 1), EOC 除了与 EC、TP 显著相关外 ($p < 0.05$), 与其他各因子均无显著相关性, 而 SOC、DOC 和 MBC 与 EC 和生物量之间无显著相关性, 但与 pH、TP 和 TN 呈显著相关 ($p < 0.01$), 其中, 与 pH 呈显著负相关, 与 TP 和 TN 呈显著正相关, 从相关系数的大小来看, pH、TP 和 TN 可以被认为是影响 SOC 的主要理化因子. 但具体来看, 由于不同有机碳活性组分特性有所差异, 其对环境因子的敏感性也存在一定的差异, 如 EOC 对 pH 和 TN 较不敏感, MBC 和 DOC 对含水量较为敏感, 呈显著相关 ($p < 0.05$).

表 1 土壤理化性质与 SOC 及其活性组分的相关关系

Table 1 The relationship between soil properties and SOC and its active fractions

	EC	pH	含水量	生物量	TN	TP
SOC	-0.04	-0.81**	0.34	-0.38	0.97**	0.85**
EOC	0.48*	-0.12	0.24	-0.14	0.38	0.44*
MBC	0.25	-0.66**	0.44*	-0.23	0.77**	0.65**
DOC	0.02	-0.77**	0.44*	-0.25	0.88**	0.75**

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关, $N = 27$, 下同.

进一步进行主成分分析 (表 2), 结果显示, 第一和第二主成分贡献率达到了 70.07%, 其中, pH、含水量、TN 和 TP 与第一主成分的相关关系较好, 其

相关系数分别为 -0.81、0.71、0.89 和 0.68, 这表明土壤 pH、TN 和 TP 等土壤理化性质在驱动闽江口沼泽湿地土壤碳库变化中占重要地位.

表 2 主成分载荷矩阵

Table 2 Load matrix of principal component analysis

主成分	贡献率	载荷					
		EC	pH	含水量	TN	TP	生物量
主成分 1	51.13%	0.65	-0.81	0.71	0.89	0.68	-0.48
主成分 2	18.94%	-0.56	0.04	-0.31	0.37	0.68	0.38

4 讨论 (Discussion)

4.1 水淹频率对 SOC 及其活性组分的影响

水淹频率变化是河口潮汐湿地生态系统关键环境因子之一, 对 TOC、TN 和 TP 有一定影响 (徐治国等, 2006; Spohn *et al.*, 2013; Luo *et al.*, 2014). 本研究表明, 除 7 月份 MBC 外, M 样地的 SOC 及其活性组分均显著低于 H 样地 ($p < 0.05$), 与崇明岛东滩不同潮滩 SOC 分布研究结果相一致 (王红丽等, 2009). 这说明水淹频率增加对 SOC 及其活性组分长期影响十分明显, 表现为 SOC 及其活性组分含量

随着水淹频率增加而降低. 产生这一现象与水淹频率和河口、潮汐水动力有很大关系, 一方面, 河口沼泽湿地不同潮滩水动力条件有所不同, 在靠海地区, 受到潮汐影响更为剧烈, 当地植物枯落物和动物残体更频繁的被潮汐带走, 进而减少了有机碳输入量 (高建华等, 2005). 本文的植物地上生物量调查显示, H 和 M 两个样地植物地上生物量最大值分别为 $(1517.61 \pm 31.23) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $(1366.79 \pm 195.84) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 两者之间没有显著差异 ($p > 0.05$). 一般而言, 植物地上生物量达到峰值后将进入枯落归还期, 通过枯落物归还土壤 (王丽等, 2008), 但 M 样地水淹

频率远高于 H 样地,其植物枯落物及动物残体更容易被带走,减少了地上部分凋落物质向土壤输入,这可能是造成 H 和 M 两样地 SOC 及活性组分差异原因之一.另一方面,水淹频率和水动力直接影响有机碳各活性组分的赋存,本文基于野外原位培养实验发现,水淹频率增加对 SOC 和 EOC 的短期影响不大,但对 MBC 和 DOC 短期效应显著.H 样地植物-土壤移动到 M 样地培养 90 d 后,与 H 样地相比, MBC 和 DOC 含量呈显著下降趋势,下降比例分别约为 28.21%和 93.84%.这是因为 MBC 和 DOC 对环境变化较为敏感,其中, MBC 主要是土壤中细菌、真菌和微动物体内所含的碳.有研究表明,长期水淹时微生物生理活动缺氧而受到限制,不利于土壤微生物生长 (Poret-Peterson *et al.*, 2007; 万忠梅等, 2009),当 H 样地植物-土壤移动到 M 样地培养后,水淹频率增加,微生物活性降低,导致 MBC 含量显著降低,而 DOC 主要源自植物枯落物和根系分泌物等有机质的水解,所以 H 样地植物-土壤移动到 M 样地后,受潮汐影响更为剧烈,加速了 DOC 的释放,导致土壤 DOC 含量显著减少.SOC 及其活性组分之间的相关分析显示(表 3),SOC 及其活性组分之间均呈显著正相关($p < 0.01$),其相关系数均大于 0.48,其中, MBC 和 EOC 与 SOC 的相关系数分别高达 0.83 和 0.93,这表明土壤有机碳活性组分含量很大程度取决于 SOC 含量,同时其对土壤有机碳库具有很重要的影响,是 SOC 变化的驱动力(赵鑫等, 2007).因此,当水淹频率增加后, MBC 和 DOC 含量降低,但由于 MBC 和 DOC 占 SOC 比例小,导致短期内 SOC 含量变化不明显,但在长期作用下, SOC 含量将降低.

表 3 SOC 及其活性组分之间的相关关系

Table 3 The relationship between SOC and its active fractions

	SOC	EOC	MBC	DOC
SOC	1			
EOC	0.93**	1		
MBC	0.83**	0.76**	1	
DOC	0.51**	0.59**	0.48**	1

4.2 土壤理化性质对 SOC 及其活性组分的影响

水文条件可以通过土壤碳输入与输出直接影响 SOC 及其活性组分,也可以通过作用于含水量、容重、EC、pH、TN 和 TP 等理化性质间接影响 SOC 及其活性组分 (Spohn *et al.*, 2013).本文通过分析表明,除 EOC 外, SOC 及其活性组分均与 pH

呈显著负相关 ($r \geq -0.66$, $N = 27$, $p < 0.01$),与 TN ($r \geq -0.77$, $N = 27$, $p < 0.01$) 和 TP ($r \geq -0.65$, $N = 27$, $p < 0.01$) 呈显著正相关,这与多数学者(李春越等, 2013; 郭志华等, 2014) 研究结果相一致.主成分分析进一步显示, pH、含水量、TN 和 TP 与第一主成分的相关关系较好,这说明 pH、TN 和 TP 是驱动河口沼泽湿地有机碳库变化的主要土壤理化性质.其中, pH 可以通过土壤微生物活性调节影响 SOC 及其活性组分外(谢军费等, 2002),也可以直接影响 SOC 及其活性组分含量,如 Vance 等(1989)通过酸淋溶土柱实验发现,其溶液中的 SOC 含量随 pH 的升高而升高,这说明 pH 升高后,冲刷带走的 SOC 含量增加,而土壤中 SOC 含量将减少;之后, Grybos 等(2009)通过研究 pH 增加对土壤可溶性有机碳影响发现, pH 从 5.5 变化到 7.4, DOC 释放量增加了 240%,也进一步证实了这个结论;本研究 M 样地土壤 pH (5.84 ± 0.11) 显著高于 H 样地 (5.47 ± 0.11),这会促进 M 样地土壤 DOC 释放,最终将使得 SOC 及其活性组分含量减少.此外, TN 和 TP 对 SOC 也有重要作用,湿地土壤碳、氮和磷是衡量土壤质量的重要指标,对湿地的初级生产力有直接影响,三者之间有密切的相互耦合关系,其化学计量比对碳固定有很大影响(王绍强等, 2008).有研究认为,表层土壤 C/N 越低,有机质矿化作用越快(Prescott *et al.* 2000),碳固持能力相对较弱;另外,较高的 C/P 可能导致微生物分解有机质的过程受限,反之,则有利于微生物分解,养分释放(王建林等, 2014).本研究区 M 样地土壤 C/N 和 C/P 分别为 11.84 ± 0.32 和 25.59 ± 0.72 ,均显著小于 H 样地土壤 C/N (12.66 ± 0.41) 和 C/P (54.46 ± 2.24) ($p < 0.05$),使得 M 样地微生物分解有机质形成养分释放,而碳累积能力较弱,也使得其 SOC 及其活性组分含量较低.

5 结论 (Conclusions)

本研究通过闽江口鱗鱼滩湿地土壤野外原位采样和原位控制培养相结合的方法,比较了高潮滩(偶尔水淹)和中潮滩(频繁水淹) SOC 及其活性组分的差异,并进一步分析了水淹频率增加对 SOC 及其活性组分的影响,结果发现,中潮滩(频繁水淹)的 SOC 及其活性组分含量总体显著小于高潮滩(偶尔水淹)的 SOC 及其活性组分含量;短期增加水淹频率对 SOC 和 EOC 没有显著影响,但对 MBC 和 DOC 影响显著,水淹频率增加后 MBC 和 DOC 总体

均呈下降趋势,是闽江口湿地 SOC 库变化的重要驱动力之一;水淹频率、pH、TN 和 TP 是影响闽江口鳊鱼滩湿地 SOC 及其活性组分的主要因子。

责任作者简介:曾从盛(1954—),男,博士生导师,研究员,主要研究方向为湿地生物地球化学循环、生态-地理过程与功能。

参考文献(References):

- Bai J, Wang J, Yan D, *et al.* 2012. 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*, 40(10): 1137-1144
- Blair G J, Lefroy R D, Lisle L. 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Crop and Pasture Science*, 46(7): 1459-1466
- Chantigny M H. 2003. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices [J]. *Geoderma*, 113(3): 357-380
- FitzGerald D M, Fenster M S, Argow B A, *et al.* 2008. Coastal impacts due to sea-level rise [J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 36: 601-647
- 高灯州, 曾从盛, 章文龙, 等. 2014. 闽江口湿地土壤有机碳及其活性组分沿水文梯度分布特征 [J]. *水土保持学报*, 28(6): 216-221
- 高建华, 杨桂山, 欧维新. 2005. 苏北滩涂湿地不同生态带有机质来源辨析与定量估算 [J]. *环境科学*, 26(6): 51-56
- Grybos M, Davranche M, Gruau G, *et al.* 2009. Increasing pH drives organic matter solubilization from wetland soils under reducing conditions [J]. *Geoderma*, 154(1): 13-19
- 郭志华, 张莉, 郭彦茹, 等. 2014. 海南清澜港红树林湿地土壤有机碳分布及其与 pH 的关系 [J]. *林业科学*, 50(10): 8-15
- Lewis D B, Brown J A, Jimenez K L. 2014. Effects of flooding and warming on soil organic matter mineralization in *Avicennia germinans* mangrove forests and *Juncus roemerianus* salt marshes [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 139: 11-19
- 李春越, 王益, Brookes P, 等. 2013. pH 对土壤微生物 C/P 比的影响 [J]. *中国农业科学*, 46(13): 2709-2716
- 刘剑秋. 2006. 闽江河口湿地研究 [M]. 北京: 科学出版社
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社
- Luo M, Zeng C S, Tong C, *et al.* 2014. Abundance and speciation of iron across a subtropical tidal marsh of the Min River Estuary in the East China Sea [J]. *Applied Geochemistry*, 45: 1-13
- Poret-Peterson A T, Ji B, Engelhaupt E, *et al.* 2007. Soil microbial biomass along a hydrologic gradient in a subsiding coastal bottomland forest: Implications for future subsidence and sea-level rise [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(2): 641-645
- Poret-Peterson A T, Ji B, Engelhaupt E, *et al.* 2007. Soil microbial biomass along a hydrologic gradient in a subsiding coastal bottomland forest: Implications for future subsidence and sea-level rise [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(2): 641-645
- Prescott C, Chappell H, Vesterdal L. 2000. Nitrogen turnover in forest floors of coastal Douglas-fir at sites differing in soil nitrogen capital [J]. *Ecology*, 81(7): 1878-1886
- Roldán A, Salinas-García J, Alguacil M, *et al.* 2011. Changes in soil enzyme activity, fertility, aggregation and C sequestration mediated by conservation tillage practices and water regime in a maize field [J]. *Applied Soil Ecology*, 30(1): 11-20
- Spohn M, Babka B, Giani L. 2013. Changes in soil organic matter quality during sea-influenced marsh soil development at the North Sea coast [J]. *Catena*, 107: 110-117
- Syvitski J P, Kettner A J, Overeem I, *et al.* 2009. Sinking deltas due to human activities [J]. *Nature Geoscience*, 2(10): 681-686
- Vance G F, David M B. 1989. Effect of acid treatment on dissolved organic carbon retention by a Spodic horizon [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 53(4): 1242-1247
- 万忠梅, 宋长春, 郭跃东, 等. 2009. 毛茛草湿地土壤酶活性及活性有机碳组分对水分梯度的响应 [J]. *生态学报*, 28(12): 5980-5986
- 王红丽, 肖春玲, 李朝君, 等. 2009. 崇明东滩湿地土壤有机碳空间分异特征及影响因素 [J]. *农业环境科学学报*, 28(7): 1522-1528
- 王建林, 钟志明, 王忠红, 等. 2014. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征 [J]. *草业学报*, 23(2): 9-19
- 王丽, 胡金明, 宋长春, 等. 2008. 水分梯度对三江平原典型湿地植物小叶章地上生物量的影响 [J]. *草业学报*, 17(4): 19-25
- 王绍强, 于贵瑞. 2008. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征 [J]. *生态学报*, 28(8): 3937-3947
- 谢军费, 李玉娥. 2002. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展 [J]. *中国农业气象*, 23(4): 47-52
- 徐治国, 何岩, 闫百兴, 等. 2006. 营养物质及水位变化对湿地植物的影响 [J]. *生态学杂志*, 25(1): 87-92
- 张国, 曹志平, 胡婵娟. 2011. 土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用 [J]. *应用生态学报*, 17(7): 1921-1930
- 赵鑫, 宇万太, 李建东, 等. 2007. 不同经营管理条件下土壤有机碳及其组分研究进展 [J]. *应用生态学报*, 17(11): 2203-2209
- 赵鑫, 宇万太, 李建东, 等. 2011. 不同经营管理条件下土壤有机碳及其组分研究进展 [J]. *应用生态学报*, 17(11): 2203-2209
- Zhong B, Xu Y J. 2011. Risk of inundation to coastal wetlands and soil organic carbon and organic nitrogen accounting in Louisiana, USA [J]. *Environmental science & technology*, 45(19): 8241-8246