

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

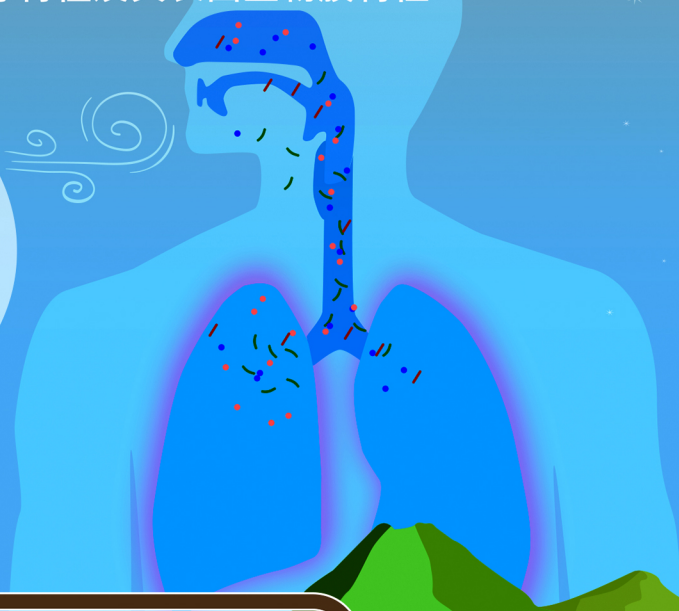
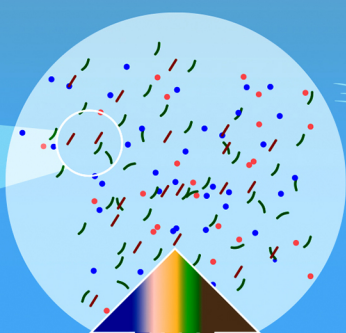
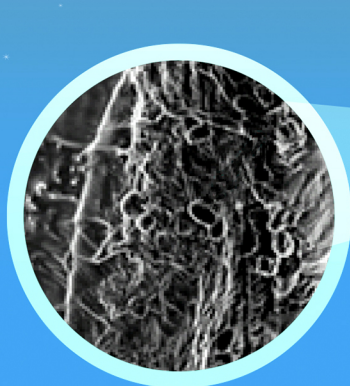
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM _{2.5} 时空特征与驱动因素分析	葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气PM _{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据	曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析	杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区PM _{2.5} 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征	庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源	陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化	江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势	李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价	张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析	刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源	韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O ₃ 生成潜势的杭州市PM _{2.5} 和O ₃ 协同控制	林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响	王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应	王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性	涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征	高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征	杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析	廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重	秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系	雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素	涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO ₃ ⁻ -N时空变化及驱动因素	袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析	王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义	王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素	陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性	程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响	高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素	朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价	弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险	靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价	李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响	张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响	王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析	岳桢桢, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附铅的影响及其机制	王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co ₃ O ₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明B	王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe ²⁺ 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮	郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性	杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价	张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义	王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素	张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征	王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价	王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价	朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析	陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果	任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响	张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性	刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N ₂ O排放的影响	胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性	王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响	周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响	马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响	张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征	黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望	刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929)	《环境科学》征稿简则(1975)
信息(1996, 2029, 2080)	

九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征

黄小清^{1,2}, 仝川^{1,2}, 罗敏^{3*}, 杨洋^{1,2}, 谭凤凤^{1,2}, 潘哲妍^{1,2}, 刘娜^{1,2}, 陈欣³, 黄佳芳^{1,2}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建师范大学湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007; 3. 福州大学环境与安全工程学院, 福州 350116)

摘要: 淹水频率是影响河口潮滩湿地固碳潜力的关键环境因子之一。为了揭示淹水频率增加对河口潮滩湿地土壤碳动态的影响, 对福建省九龙江河口潮滩剖面土壤有机碳(SOC)储量、活性有机碳组分和碳库稳定性指数 CSI 进行了测定与分析。结果表明, 随着淹水频率的增加, SOC 的储量减少 54%, 土壤活性有机碳组分 MBC、DOC 和 LOC 的含量亦随着淹水频率的增加而减少。随着淹水频率的增加, 活性组分中 DOC/SOC 和 LOC/SOC 分别增加 80% 和 26%, 而 MBC/SOC 减少 29%, 说明随着淹水的增加土壤有机碳活性组分中 MBC 的相对累积速率变缓, LOC 和 DOC 的相对累积速率增加。土壤 POC 和 MAOC 的含量随着淹水频率的增加分别减少 81% 和 35%。土壤 POC 含量降低与土壤 pH 的增加有关, 而土壤 MAOC 含量降低则与土壤黏粒的含量减少有关。土壤稳定性指数 CSI 随着淹水频率增加而增加 246%。随着淹水频率的增加, 河口潮滩湿地土壤有机碳储量降低, 但是土壤有机碳的稳定性增加。矿物结合态有机碳是河口潮滩湿地土壤有机碳稳定性的主要保护机制, 对河口潮滩湿地土壤碳汇具有重要意义。

关键词: 淹水梯度; 有机碳活性组分; 颗粒性有机碳; 矿物结合态有机碳(MAOC); 稳定性; 河口潮滩湿地

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-2226-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108162

Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary

HUANG Xiao-qing^{1,2}, TONG Chuan^{1,2}, LUO Min^{3*}, YANG Yang^{1,2}, TAN Feng-feng^{1,2}, PAN Zhe-yan^{1,2}, LIU Na^{1,2}, CHEN Xin³, HUANG Jia-fang^{1,2}

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process, Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. College of Environment and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Flooding is one of the key environmental factors affecting the carbon sequestration potential of estuarine tidal flat wetlands. In order to reveal the effect of flooding on soil carbon (C) sinks in estuarine tidal wetlands, we investigated and analyzed the soil organic carbon (SOC) storage, the contents of active SOC components, and SOC stability indicators across a tidal flat in the Jiulong River estuary in southeast China. The results showed that the SOC storage gradually decreased by 54% with the increase in flooding frequency. The change pattern of microbial biomass carbon (MBC), dissolved organic carbon (DOC), and labile organic carbon (LOC) followed the change pattern of the SOC storage. With the increase in flooding frequency, DOC/SOC and LOC/SOC increased by 80% and 26%, respectively, whereas MBC/SOC decreased by 29%. As flooding frequency increased, particulate organic carbon (POC) and mineral-associated organic carbon (MAOC) contents decreased by 81% and 35%, respectively. The decreases in POC contents were correlated with the increases in soil pH, whereas the decreases in MAOC contents were associated with the decline in clay contents. Soil carbon stability index (CSI) increased by 246% with increasing flooding frequency. These combined results indicated that SOC storage decreased, but SOC stability increased, with the increased flooding frequency. Mineral-bound organic carbon was the main protection mechanism for the SOC stability, which was of great significance to the soil C sink of the estuarine tidal wetlands.

Key words: flooding gradient; organic carbon active component; particulate organic carbon; mineral-associated organic carbon(MAOC); stability; estuarine tidal wetland

河口潮滩湿地, 如红树林湿地、盐沼湿地和海草湿地, 所占面积不到海洋面积的 0.5%, 但所固存的碳含量达到海洋沉积物碳固存总量的 50%^[1], 在全球碳循环中起着重要作用^[2~4]。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)库是土壤质量的重要指标^[5]。土壤有机碳通过影响土壤的物理、化学和生物特性, 对河口潮滩湿地生态系统服务功能产生深远的影响^[6,7]。在全球土壤碳库及其相关的碳循环研究中, 陆地生态系统土壤碳库和碳循环研究比较深入^[8~10], 但对于海陆交界处, 受潮汐水文影响的河口潮滩湿地的研究较单薄^[11]。已有研究也多集中在

河口潮滩湿地 SOC 储量^[12], 鲜见河口潮滩湿地有机碳活性组分和稳定性机制等方面的相关报道。

土壤有机碳根据土壤团聚体颗粒大小分级的方法将有机碳划分为颗粒性有机碳(particulate organic carbon, POC, > 53 μm)和矿物结合态有机碳

收稿日期: 2021-08-16; 修订日期: 2021-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877335, 32071598); 福建省基金重点项目(2019J02008); 福建省基金项目(2020J01503); 福建省林业科技项目(201935, 2021FKJ30)

作者简介: 黄小清(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地生态, E-mail: Hxiaoqing23@163.com

* 通信作者, E-mail: luomin@fzu.edu.cn

(mineral-associated organic carbon, MAOC, $< 53 \mu\text{m}$)^[13,14]. 土壤 MAOC 主要是由微生物分解产物与矿质土壤基质的强化学结合而形成,能防止有机碳快速分解^[15]. 因此,土壤 MAOC 属于惰性有机碳库^[16]. 相较之下,土壤 POC 易受到环境变化的影响,属于活性有机碳库^[17]. 已有研究中常用碳库稳定性指数(carbon stability index, CSI),即 POC 和 MAOC 的比值来表征土壤有机碳稳定性强弱^[13]. 此外,虽然活性有机碳组分一般占 SOC 不到 50%,但对土壤碳循环过程具有重要的影响^[18]. 微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)、易分解有机碳(liable organic carbon, LOC)和溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)是土壤活性有机碳库的 3 个重要组分^[19,20],其对变化的环境因子的响应比 SOC 更加敏感^[21]. 以上活性组分受理化环境影响,对于滨海潮滩湿地的碳循环过程有着十分重要的作用^[22].

淹水梯度是河口潮滩湿地生态系统中的一个重要环境变量因子,它控制着河口潮滩湿地与海洋系统之间水文、能量和营养物质的交换^[23,24]. 目前已经开展淹水梯度的研究包括:净初级生产力、微生物分解的速率、生态系统 CO_2 交换通量和生态系统服务功能的影响等^[12,25~30]. 淹水梯度增加将显著降低河口潮滩湿地土壤的通气状况,并导致微生物活性受到抑制,使得枯落物分解与转化过程变缓,从而对土壤有机碳的积累和分解产生影响^[31]. 此外,潮水中的阳离子如: Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等,可通过离子交换加速团聚体解聚,从而破坏土壤有机碳的稳定性^[31,32]. 目前,尚未有淹水梯度上土壤有机碳的活性组分和稳定性机制变化的报道. 了解淹水梯度对河口潮滩湿地土壤有机碳组分的影响,对于阐明河口潮滩生态系统碳循环、迁移和转化规律具有重要意义.

鉴于此,本文选取福建九龙江河口潮滩湿地的潮滩剖面为研究对象,目的是探究河口潮滩湿地淹水梯度上:①有机碳碳库(SOC)储量的变化;②活性有机碳组分 MBC、DOC 和 LOC 的含量变化;③矿物结合态有机碳(MAOC)含量、颗粒性有机碳(POC)含量和碳库稳定性指数(CSI)的变化. 通过明晰淹水梯度下河口潮滩湿地土壤有机碳及其组成的空间异质性,以期厘清淹水频率对河口潮滩湿地土壤碳动态的影响机制提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

九龙江河口潮滩湿地位于($24^{\circ}22'10''\text{N} \sim$

$24^{\circ}28'43''\text{N}$, $117^{\circ}53'21''\text{E} \sim 117^{\circ}55'35''\text{E}$)我国东南福建沿海^[33],面积达 $6\,000 \text{ hm}^2$,属亚热带海洋性季风气候,该地区年平均降水量为 $1\,400 \sim 1\,800 \text{ mm}$,年平均气温为 $19 \sim 21^{\circ}\text{C}$. 该潮滩的潮汐为典型半日潮,平均潮差从河口上部到河口下部为 $2.7 \sim 4.0 \text{ m}$ ^[34]. 研究区(甘文尾)位于九龙江河口潮滩湿地内的龙海市红树林自然保护区. 沿着河口潮滩滩面由陆向海方向依次分布着秋茄(*Kandelia obovata*)红树林群落、秋茄和互花米草交错带、互花米草(*Spartina alterniflora*)群落和光滩等 4 个生境(图 1). 潮滩剖面的平均淹水频率由 4% 增加至 25% (图 1),淹水频率由 Model 3001 水文计记录(Solinst 有限公司,加拿大). 红树林群落位于高潮滩,交错带和互花米草群落位于中潮滩,光滩位于低潮滩.

1.2 土壤样品采集与前处理

于 2019 年 12 月进行野外采样. 在红树林群落、交错带、互花米草群落和光滩等 4 个不同生境各选取 1 个典型样地(图 1),每个样地 S 形采集 4 个土样(重复). 采样时,先去除土壤地表的凋落物,然后用内直径为 10 cm 的土钻采集 40 cm 土柱,并分为 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 和 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 两层. 将土样分别装入样品袋,挤出袋子内部空气以密封保存,将样品装入放有冰袋的保温箱中带回实验室备用. 原位测定土壤电导、pH 和氧化还原电位(ORP). 在实验室先混匀各样品,然后取部分土样测定土壤含水率和容重. 将剩余土样过 60 目筛,去除土样中的残余根系和砾石. 将过筛后的鲜土样分成 2 份,一份用于测定土壤微生物生物量碳(MBC)和可溶性有机碳(DOC)含量,需 4°C 冷藏保存. 另一份用于测定易分解有机碳(LOC)、颗粒性有机碳(POC)、矿物结合态有机碳(MAOC)和土壤有机碳(SOC)含量,需自然风干后研磨过筛.

1.3 测定方法

土壤 pH 值采用 pH450 便携式 pH 计(Spectrum Technologies,美国)原位测定;土壤氧化还原电位 ORP 运用 Ag/AgCl 参比电极的 FJA-6 型 ORP 仪(南京传滴仪器设备有限公司,检测限 $= 0.1 \text{ mV}$)原位测定;电导率 EC 运用 EC450 便携式电导仪(Spectrum Technologies,美国)原位测定;容重和含水率采用烘干称重法测定;土壤粒径采用粒径分析仪(马尔文帕纳科,MasterSizer 2000,英国)测定.

土壤 SOC 在土壤酸化后采用土壤碳氮元素分析仪(艾力蒙塔贸易有限公司;Elementar Vario MAX,德国)测定;即先用浓度为 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 去除土壤中的无机碳,用蒸馏水洗至中性后风干研磨上机测定.

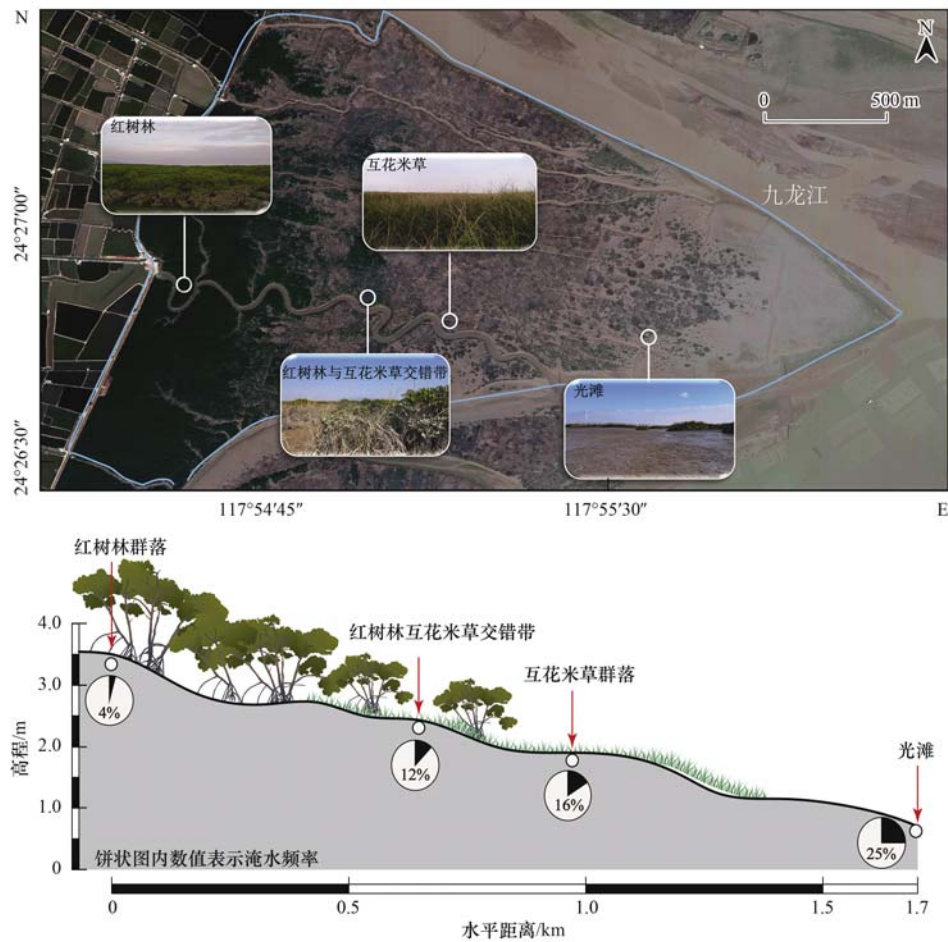


图1 九龙江河口潮滩湿地采样点示意
Fig. 1 Study area and sampling sites in the Jiulong River estuary

土壤 DOC 采用无二氧化碳水浸提法测定^[35], 具体操作为:称取 5 g 过筛后的鲜土样,依次加入 25 mL 的无二氧化碳水(沸腾后自然冷却的去离子水)浸提,浸提液使用 0.45 μm 玻璃纤维滤膜过滤,样品于 24 h 内上机测定.测定仪器采用 TOC-L CPH 总有机碳分析仪(岛津,日本,检测限为 2 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$).

土壤 MBC 采用氯仿熏蒸法与 0.5 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ K_2SO_4 浸提法测定^[36].具体操作为:用 25 mL 玻璃烧杯称取 5 g 鲜土进行熏蒸,同时设置对照(不熏蒸).熏蒸样品需在干燥皿中放入氯仿(烧杯底部铺有一层玻璃珠)及 0.2 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液,并保持真空密封.二者均在室温下避光培养 24 h.培养完成后分别用 20 mL 浓度为 0.5 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 K_2SO_4 溶液浸提,上清液过 0.45 μm 的玻璃纤维滤膜(滤膜在使用前经马弗炉 400 $^{\circ}\text{C}$ 烘 2 h).液体样品于 48 h 内采用 TOC-L CPH 总有机碳分析仪(岛津,日本,检测限为 2 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)测定有机碳含量.则土壤 MBC 的计算如公式(1):

$$\text{MBC} = (C_1 - C_2) / 0.45 \quad (1)$$

式中, C_1 为熏蒸样有机碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); C_2 为未

熏蒸样有机碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); MBC 为所测土壤 MBC 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

土壤 LOC 采用 KMnO_4 氧化法测定^[37].具体步骤为:2 g 过 10 目筛风干土样,混合 25 mL 浓度为 333 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KMnO_4 溶液,振荡使其充分反应,而后离心提取上清液.加入去离子水稀释上清液(样水比为 1:250),稀释液需于 2 h 内上机测定.测定仪器为 UV-1800 紫外可见分光光度计(岛津,日本),对应比色波段为 565 nm.

土壤 POC 与 MAOC 采用湿筛法测定^[38].具体步骤为:10 g 风干土样(已过 10 目筛, W_0),加入 50 mL 浓度为 5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的六偏磷酸钠溶液,室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 速度 90 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 18 h 使其充分混合反应,振荡后的混合液搅匀后过 300 目筛,并用蒸馏水反复冲洗筛上物质至土壤颗粒无法下渗.收集筛上物质于 100 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱烘干,确保土样完全烘干至恒重并称重(W_1),研磨过筛备用.筛下的混合液静置 24 h 后离心,用蒸馏水冲洗数次至上清液澄清,将沉淀物烘干称重(W_2),研磨过筛备用.使用土壤碳氮元素分析仪(艾力蒙塔贸易有限公司; Elementer Vario MAX CN,德国)分别测定筛上、筛下物质有机碳含量.则

土壤 POC 和 MAOC 含量计算依次如公式(2)和公式(3):

POC = C₁ × W₁/W₀ (2)

MAOC = C₂ × W₂/W₀ (3)

式中, C₁ 为筛上物质有机碳含量(g·kg⁻¹); C₂ 为筛下物质有机碳含量(g·kg⁻¹); W₁ 为筛上颗粒物干重(g); W₂ 为筛下沉淀物干重(g); W₀ 即为 10 (g); POC 即为所测土壤 POC 含量(g·kg⁻¹); MAOC 即为所测土壤 MAOC 含量(g·kg⁻¹).

1.4 稳定性指数

土壤碳库稳定性指数(carbon stability index, CSI)通常由矿物结合态有机碳含量和颗粒性有机碳含量的比值来表征^[13,14],如公式(4):

CSI = MAOC/POC (4)

式中,MAOC 为矿物结合态有机碳含量(g·kg⁻¹); POC 为颗粒性有机碳含量(g·kg⁻¹). 其中,土壤矿物结合态有机碳 MAOC 的相对含量越高,土壤稳定性越强.

1.5 数据处理

文中所有数据分析均采用 SPSS 25.0 软件完成. 首先检验数据的正态分布和方差齐次性,不符合正态分布的数据需进行置换而后再分析. 检验不同生境及土层深度对土壤有机碳组分及稳定性系数的影响采用双因素方差分析(Two-way ANOVA). 双因素分析有显著差异结果的数据进行 Tukey 事后检验分析,以明晰相同处理下的组间差异. 不同有机碳组分及占比与理化因子之间的相关性采用 Pearson 相

关分析检验. 数据分析显著性均保证 P = 0.05,文中所有数据均以平均值(mean) ± 标准差(standard deviation)的形式呈现.

2 结果与分析

2.1 淹水梯度上不同生境的理化指标分析

九龙江河口潮滩湿地土壤理化性质如表 1 所示. 土壤电导率 EC 的变化范围为(6.85 ± 0.29) ~ (14.00 ± 1.94) mS·cm⁻¹,不同生境间土壤电导率 EC 有显著差异(P < 0.001),光滩和互花米草生境的电导率 EC 高于红树林和交错带. 不同深度土层之间土壤电导率 EC 无显著差异. 土壤 pH 的变化范围为(5.00 ± 0.03) ~ (7.00 ± 0.12),土壤 pH 值随着淹水频率增加而增大(P < 0.001),光滩 0 ~ 20 cm 土层的 pH 高于 20 ~ 40 cm 土层,其他生境不同深度土层之间 pH 无明显差异. 土壤氧化还原电位 ORP 处于(-255.91 ± 8.81) ~ (-151.62 ± 3.46) mV,土壤氧化还原电位 ORP 随着淹水频率增加而减小(P < 0.001). 0 ~ 20 cm 土层的氧化还原电位 ORP 含量均高于 20 ~ 40 cm 土层(P < 0.001). 土壤容重处于(0.59 ± 0.07) ~ (0.87 ± 0.07) g·cm⁻³,光滩和互花米草的容重要显著高于红树林和交错带(P < 0.001). 含水率处于(43.36 ± 0.67)% ~ (53.88 ± 2.27)%,随着淹水频率的增加,土壤含水率也逐渐增加(P < 0.001). 不同生境下土壤粒径均以粉粒为主[(81.50 ± 0.93)% ~ (82.55 ± 2.28)%],黏粒[(9.97 ± 0.27)% ~ (16.10 ±

表 1 九龙江河口潮滩湿地土壤理化性质¹⁾

Table 1 Soil physicochemical properties in the tidal wetland of the Jiulong River estuary

指标	深度 /cm	沿淹水频率增加方向的 4 种生境				双因素方差分析		
		红树林	交错带	互花米草	光滩	生境	深度	交互
EC /mS·cm ⁻¹	0 ~ 20	6.85 ± 0.29B	7.35 ± 0.32B	12.03 ± 1.50A	12.44 ± 1.04A	F	47.484	0.988
	20 ~ 40	7.38 ± 0.66B	7.92 ± 0.40B	11.52 ± 1.24A	14.00 ± 1.94A	P	<0.001	0.332
pH	0 ~ 20	5.09 ± 0.10C	6.40 ± 0.32B	6.41 ± 0.39B	7.00 ± 0.12A **	F	11.156	5.092
	20 ~ 40	5.00 ± 0.03C	6.11 ± 0.12B	6.42 ± 0.15B	6.75 ± 0.07A **	P	<0.001	<0.05
ORP /mV	0 ~ 20	-151.62 ± 3.46A **	-178.91 ± 8.16B *	-189.43 ± 4.36C **	-243.07 ± 5.52D *	F	296.17	32.76
	20 ~ 40	-160.74 ± 3.14A **	-188.63 ± 7.56B *	-209.87 ± 7.69C **	-255.91 ± 8.81D *	P	<0.001	<0.001
容重 /g·cm ⁻³	0 ~ 20	0.66 ± 0.06B	0.69 ± 0.07B	0.78 ± 0.03A	0.87 ± 0.07A	F	13.590	0.554
	20 ~ 40	0.65 ± 0.07B	0.59 ± 0.07B	0.79 ± 0.16A	0.87 ± 0.07A	P	<0.001	0.453
含水率 /%	0 ~ 20	43.36 ± 0.67C	48.04 ± 0.94B	51.17 ± 1.00B	53.88 ± 2.27A	F	20.34	0.638
	20 ~ 40	45.34 ± 2.74C	50.14 ± 3.17B	46.72 ± 2.73B	52.21 ± 2.68A	P	<0.001	<0.05
黏粒 /%	0 ~ 20	16.10 ± 0.48A	14.60 ± 0.24B	14.25 ± 1.46B	10.40 ± 0.31C	F	49.558	0.29
	20 ~ 40	14.94 ± 0.79A	14.45 ± 0.78B	13.78 ± 1.80B	9.97 ± 0.27C	P	<0.001	0.59
粉粒 /%	0 ~ 20	81.50 ± 0.93A	82.39 ± 0.57A	82.20 ± 2.08A	81.70 ± 0.72A	F	0.799	0.011
	20 ~ 40	81.62 ± 0.84A	82.18 ± 0.52A	82.55 ± 2.28A	81.83 ± 0.68A	P	0.507	0.905
砂粒 /%	0 ~ 20	2.40 ± 0.72B	3.01 ± 0.53B	3.55 ± 0.90B	7.90 ± 0.62A	F	32.533	0.246
	20 ~ 40	3.44 ± 0.54B	3.37 ± 0.68B	3.67 ± 1.01B	8.20 ± 0.44A	P	<0.001	0.625

1) 黑体字表示不同处理下差异显著; 不同大写字母表示不同生境之间差异显著(P < 0.05); 不同星号表示同一生境下不同深度土层之间差异显著(*表示 P < 0.05, **表示 P < 0.01)

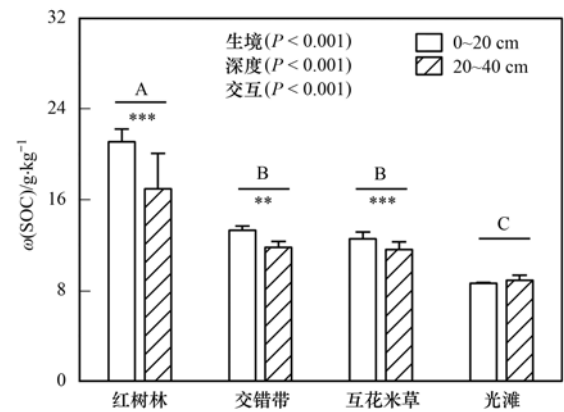
0.48%)]次之,砂粒 $[(2.40 \pm 0.72)\% \sim (8.20 \pm 0.44)\%]$ 最少.由陆向海,土壤黏粒占比随着淹水频率增加而减少,而砂粒占比显著随着淹水频率的增加而增加($P < 0.001$),粉粒含量无显著变化.不同深度土层之间土壤容重、含水率、黏粒、粉粒和砂粒的含量均无明显区别.

2.2 淹水梯度上不同生境的土壤有机碳总量的差异

九龙江河口潮滩湿地土壤 $\omega(\text{SOC})$ 的变化范围为 $(8.63 \pm 0.07) \sim (21.08 \pm 1.13) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图2).不同生境之间土壤SOC储量差异显著,整体表现为:红树林>交错带>互花米草>光滩($P < 0.001$).红树林、交错带和互花米草0~20 cm土层的SOC储量均高于20~40 cm土层($P < 0.001$);而光滩不同深度土层之间土壤SOC储量无显著差异(图2).

2.3 淹水梯度上不同生境的土壤有机碳活性组分的差异

土壤 $\omega(\text{MBC})$ 变化范围为 $(24.49 \pm 3.63) \sim (123.63 \pm 7.47) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图3(a)],土壤MBC/



不同大写字母表示不同生境之间差异显著($P < 0.05$);不同星号表示同一生境下不同深度土层之间差异显著(*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$),下同

图2 九龙江河口潮滩湿地土壤SOC储量的变化

Fig. 2 Change in the soil organic carbon storage in the tidal wetland of the Jiulong River estuary

SOC变化范围为0.3%~0.6%[图3(b)].土壤MBC含量和MBC/SOC均随着淹水频率增加而减少

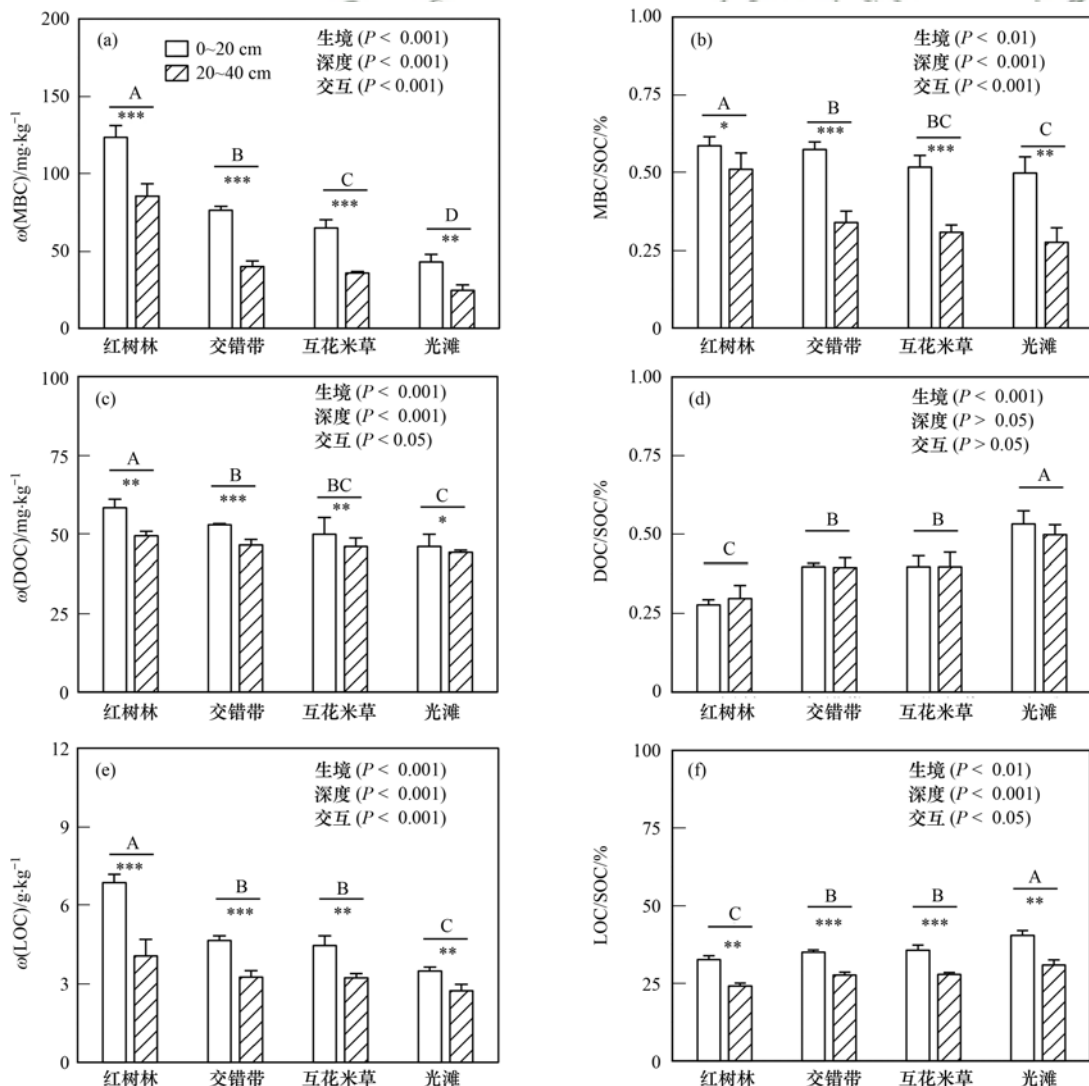


图3 九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳活性组分及其在SOC的占比的变化

Fig. 3 Change in active soil organic carbon component contents and their proportions to SOC storage in the tidal wetland of the Jiulong River estuary

[$P < 0.001$, 图 3(a) 和 3(b)]. 不同深度土层之间 MBC 含量和 MBC/SOC 差异显著, 0~20 cm 土层 MBC 含量和 MBC/SOC 均高于 20~40 cm 土层 [$P < 0.001$, 图 3(a) 和 3(b)].

土壤 $\omega(\text{DOC})$ 变化范围为 $(44.20 \pm 0.66) \sim (58.32 \pm 2.72) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图 3(c)], 土壤 DOC/SOC 变化范围为 0.3%~0.5% [图 3(d)]. 土壤 DOC 含量随着淹水频率的增加逐渐减少, 但 DOC/SOC 随着淹水频率增加而增大 [$P < 0.001$, 图 3(c) 和 3(d)]. 从深度上看, 0~20 cm 土层 DOC 含量显著高于 20~40 cm 土层 ($P < 0.05$), 不同深度土层之间 DOC/SOC 无显著差异 [图 3(c) 和 3(d)].

土壤 $\omega(\text{LOC})$ 变化范围为 $(2.74 \pm 0.15) \sim (6.87 \pm 0.32) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图 3(e)], 土壤 LOC/SOC 变化范围为 24%~40% [图 3(f)]. 土壤 LOC 含量随着淹水频

率增加而减少, 而 LOC/SOC 随着淹水频率增加而增大 [$P < 0.001$, 图 3(e) 和 3(f)]. 从深度上看, 0~20 cm 土层的 LOC 含量和 LOC/SOC 均显著高于 20~40 cm 土层 [$P < 0.01$, 图 3(e) 和 3(f)].

2.4 淹水梯度上不同生境的土壤颗粒性有机碳、矿物结合态有机碳和碳库稳定性指数的差异

土壤 $\omega(\text{POC})$ 变化范围为 $(1.28 \pm 0.26) \sim (8.80 \pm 1.16) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图 4(a)], 土壤 $\omega(\text{MAOC})$ 变化范围为 $(7.35 \pm 0.30) \sim (12.28 \pm 0.49) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图 4(b)]. 土壤 POC 含量和 MAOC 含量均随着淹水频率增加而减少 ($P < 0.001$, 图 4). 红树林生境下 0~20 cm 土层的 POC 含量和 MAOC 含量均大于 20~40 cm 土层 ($P < 0.05$, 图 4). 而其他生境下不同深度土层之间 POC 含量和 MAOC 含量均无显著差异 (图 4).

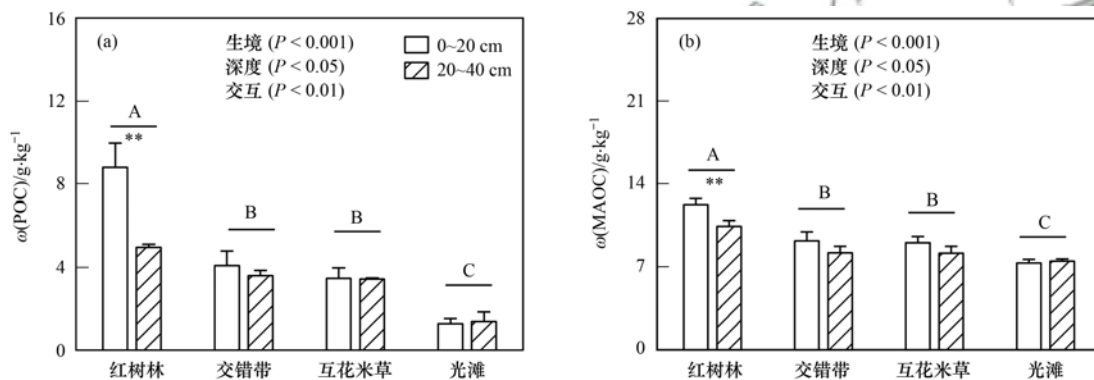


图 4 九龙江河口潮滩剖面土壤 POC 和 MAOC 含量的变化

Fig. 4 Changes in the soil POC and MAOC in the tidal wetland of the Jiulong River estuary

土壤有机碳稳定性指数 CSI 变化范围为 $(1.42 \pm 0.24) \sim (6.10 \pm 2.02)$ (图 5). 土壤 CSI 随着淹水频率增加而增加 ($P < 0.001$, 图 5). 红树林生境下 0~20 cm 土层的 CSI 小于 20~40 cm 土层 ($P < 0.01$, 图 5), 而其他生境下不同深度土层之间土壤

CSI 均无显著差异 (图 5).

2.5 土壤有机碳各组分之间、组分和占比与其他因子间的相关性分析

土壤有机碳各组分之间的相关性分析如表 2 所示. SOC、MBC、DOC、LOC、POC 和 MAOC 等不同碳组分之间均呈显著正相关 ($r \geq 0.762$, $n = 32$, $P < 0.01$). 土壤有机碳各组分和占比与理化因子之间的相关性分析如图 6 所示. MBC/SOC 与土壤电导率 EC 呈显著负相关关系 [$P < 0.01$, 图 6(a)], 表明潮滩湿地海向盐度变化会影响微生物活性. LOC/SOC 与土壤氧化还原电位 ORP 呈显著负相关关系 [$P < 0.01$, 图 6(b)], 说明土壤 LOC 受氧化还原环境影响. 土壤 POC 与土壤 pH 呈显著负相关关系 [$P < 0.01$, 图 6(c)], 该结果表明淹水梯度上 POC 的减少是由于土壤 pH 增加而引起. 土壤 MAOC 与土壤黏粒呈显著正相关关系 [$P < 0.01$, 图 6(d)], 该结果表明淹水梯度上 MAOC 的减少是由于淹水梯度上土壤黏粒含量的下降造成的.

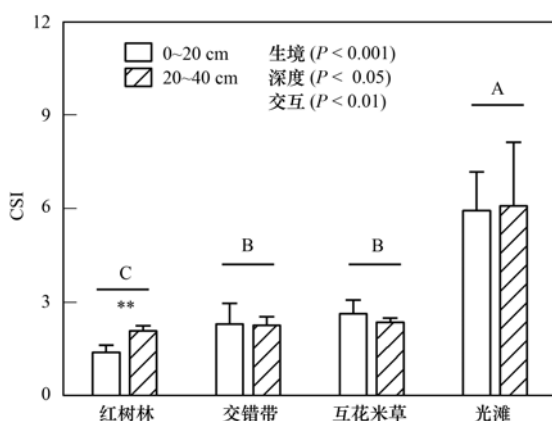


图 5 九龙江河口潮滩剖面土壤有机碳稳定性指数 CSI 的变化

Fig. 5 Changes in the soil carbon stability indexes in the tidal wetland of the Jiulong River estuary

表 2 土壤有机碳各组分之间的相关性分析¹⁾
Table 2 Correlation between the organic carbon components

	SOC	DOC	MBC	LOC	MAOC	POC
SOC	1	0.755 **	0.918 **	0.867 **	0.960 **	0.980 **
DOC	—	1	0.843 **	0.872 **	0.766 **	0.762 **
MBC	—	—	1	0.935 **	0.926 **	0.887 **
LOC	—	—	—	1	0.863 **	0.869 **
MAOC	—	—	—	—	1	0.886 **
POC	—	—	—	—	—	1

1) 不同星号表示同一生境下不同土层之间差异显著(*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$)

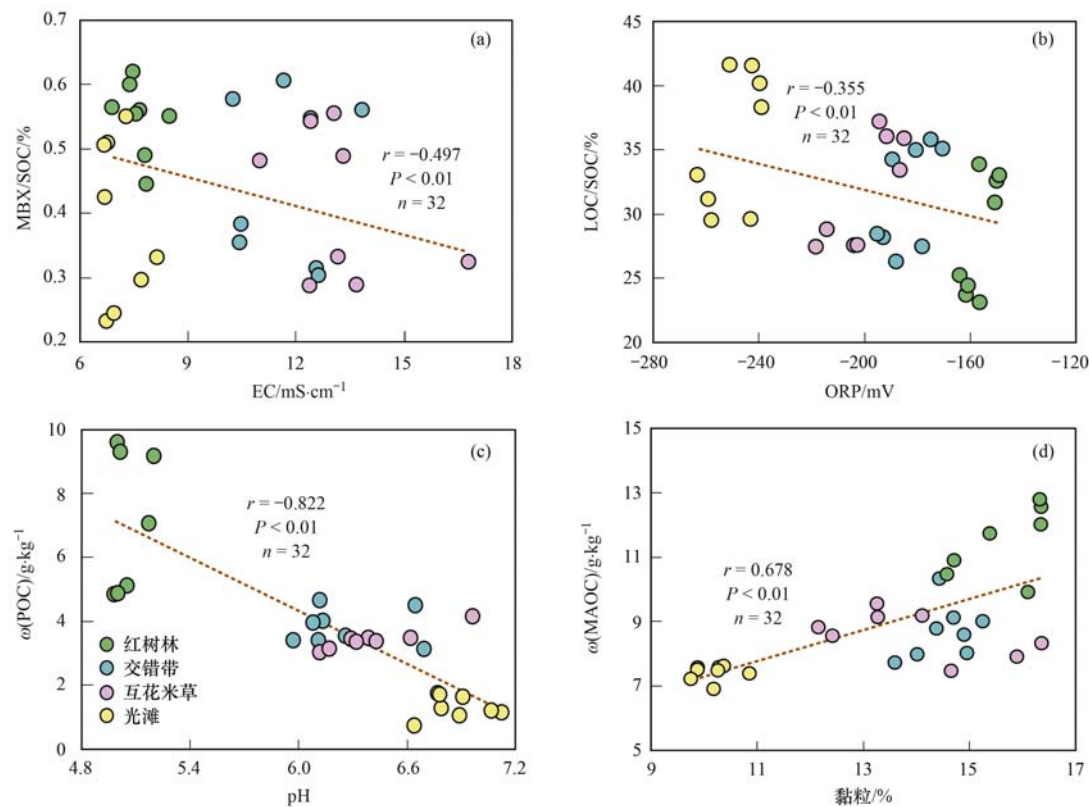


图 6 有机碳组分和占比与土壤理化性质之间的相关分析

Fig. 6 Correlation between the organic carbon components, their proportion and soil physicochemical properties

3 讨论

3.1 土壤有机碳储量沿淹水梯度分布特征

淹水频率是影响河口潮滩湿地固碳潜力的关键环境因子之一^[12]. 本研究选取我国东南沿海九龙江河口潮滩湿地作为研究对象,分析不同淹水频率下SOC储量的变化. 本研究结果表明,表层(0~20 cm)SOC的储量均随着淹水频率的增加而减少59%,深层(20~40 cm)SOC的储量均随着淹水频率的增加而逐渐减少48%(图2). 有研究发现,在美国乔治亚海岸潮滩湿地,低潮滩相对于高潮滩土壤有机碳储量减少25%^[39];在中国江苏省大丰自然保护区潮滩湿地,由陆向海土壤有机碳储量减少57%^[40];在中国崇明岛东滩湿地,土壤SOC储量随着淹水频率的增加而减少57%^[41]. 以上研究中土

壤SOC储量在空间上均与本研究表现出相同的分布特征,即:高潮滩>中潮滩>低潮滩. SOC储量河口潮滩湿地土壤中的有机碳主要来自本地植物如:地上植物凋落物、地下根系的残体和根系分泌物等^[42~46]. 在九龙江河口潮滩湿地由陆向海方向上,分别为秋茄红树林群落、红树林互花米草交错带、互花米草群落和无植被的光滩(图1). 有研究表明,红树林生境地地表年凋落物产量可达618.79 g·(m²·a)⁻¹^[47],而互花米草生境地地表年凋落物产量仅为139.30 g·(m²·a)⁻¹^[48],由于红树植物根系发达,具有高归还率,年凋落物产量和碳输入量远高于红树林互花米草交错带生境和互花米草生境^[42,46]. 因此,高潮滩(红树林)SOC储量(19.02 g·kg⁻¹)显著高于中潮滩交错带(12.55 g·kg⁻¹)和互花米草(12.07 g·kg⁻¹)(图2),且有植被的生境SOC储量

均显著高于无植被的光滩 SOC 储量 ($8.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). 由此,随着淹水频率的增加, SOC 储量逐渐减少. 在红树林、交错带和互花米草生境中,表层土壤的 SOC 储量均高于深层土壤(图 2),这是由于有植被覆盖的表层土壤接收来自地上凋落物的输入,因此,其 SOC 储量在深度方向上分异显著^[49]. 光滩生境中的表层和深层土壤 SOC 储量差异并不显著(图 2),这是由于光滩壤淋溶作用最强,故 SOC 储量在深度方向上变化不显著.

3.2 土壤有机碳活性组分沿淹水梯度分布特征

土壤微生物量碳(MBC)、溶解性有机碳(DOC)和易分解有机碳(LOC)均是重要的 SOC 活性组分,它们对环境因子的响应比土壤 SOC 储量更加敏感^[21]. 土壤 LOC 是含量最高的活性组分,其次为 DOC 和 MBC(图 3). 高灯州等^[42]在闽江河口潮汐湿地不同淹水频率下土壤有机碳组分的研究中发现,随着淹水频率的增加,土壤 MBC、DOC 和 LOC 含量分别减少了 49%、63% 和 69%. Li 等^[40]在东南沿海盐沼湿地土壤固碳的研究中发现,由陆向海土壤 MBC 含量减少 94%,DOC 含量减少 58%. 本研究发现 SOC 活性组分均随着淹水频率的增加而减少, MBC、DOC 和 LOC 含量分别减少了 80%、24% 和 60% [图 3(a)、3(c) 和 3(e)],这与上述研究的结果一致. 根系分泌物和植物凋落物是土壤 SOC 活性组分的主要碳源,故导致土壤 SOC 活性组分沿淹水梯度分布特征与 SOC 储量一致. 此外,土壤 MBC 的含量与 DOC ($r = 0.843$, $n = 32$, $P < 0.01$, 表 2) 和 LOC ($r = 0.935$, $n = 32$, $P < 0.01$, 表 2) 的含量呈现极显著的正相关,说明土壤 LOC 和 DOC 均为河口潮滩湿地土壤微生物潜在的碳源.

有机碳活性组分的占比如 MBC/SOC、DOC/SOC 和 LOC/SOC,均可反映土壤碳库的循环转化过程. 研究结果表明,随着淹水频率的增加,土壤 MBC/SOC 下降 29% [图 3(b)],而 DOC/SOC 和 LOC/SOC 分别增加 80% 和 26% [图 3(d) 和 3(f)],说明当淹水频率增加后,活性组分中 DOC 和 LOC 的相对累积速率较快,而 MBC 的相对累积速率相对变缓. 土壤 DOC/SOC 主要受潮滩水动力的调节,随着淹水频率的增加,水动力增强,加速土壤有机质的淋溶,导致土壤 DOC 的累积加快. 土壤 LOC/SOC 与土壤氧化电位 ORP 呈现显著的负相关关系 [$r = -0.355$, $n = 32$, $P < 0.01$, 图 6(b)],这说明 LOC 的周转受到氧化还原电位 ORP 的调节. 随着淹水频率的增加,土壤氧化还原电位 ORP 逐渐减少(表 1). 因此,与代谢相关的微生物活性迅速减少,造成 LOC/SOC 随着淹水频率的增加而累积[图 3(f)].

随着淹水频率的增加,土壤电导率 EC 由 $6.85 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 增加到 $14.00 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ (表 1),同时,土壤 MBC/SOC 与土壤电导率 EC 呈现显著负相关关系 [$r = -0.497$, $n = 32$, $P < 0.01$, 图 6(a)]. 说明土壤的盐度的增加会增强微生物的离子胁迫,促进有毒的低价 HS^- 或 Fe^{2+} 离子的累积,抑制微生物活性^[31]. 因此,淹水频率增加造成的土壤盐胁迫引起土壤 MBC 的产生速率降低.

3.3 土壤颗粒有机碳、矿物结合态有机碳和有机碳稳定性指数沿淹水梯度分布特征

本研究中,土壤颗粒有机碳(POC)的含量随着淹水梯度的增加而减少 81%,矿物结合态有机碳(MAOC)的含量随着淹水梯度的增加而减少 35% (图 4). 淹水梯度上土壤 POC 的含量下降,可能是由于多种因素共同作用的结果. 首先,随着淹水频率的增加,强烈的水动力作用将严重破坏土壤团聚体结构^[50],降低团聚体胶结物质与能力^[21]. 其次,土壤 POC 含量的减少可能是由于土壤 pH 增加引起的. 本研究发现从高潮滩至光滩,土壤 pH 由 5.00 逐渐增加至 7.00 (表 1),且土壤 POC 含量与 pH 呈现显著负相关关系 [$r = -0.822$, $n = 32$, $P < 0.01$, 图 6(c)]. 土壤 pH 值增大伴随着土壤团聚体吸附有机质的能力降低^[51],即土壤 pH 值增加会限制土壤大团聚体的结合能力,尤其是导致大团聚体的吸附减少,进而减少 POC 的含量^[52]. 本研究发现黏粒含量沿着淹水频率的增加逐渐减少 34% (表 1). 这主要是由于近海区域水动力作用强烈,大量黏粒随着“潮泵”作用被潮水带至附近海域中^[32]. 土壤 MAOC 的含量与土壤黏粒含量呈现正相关关系 [$r = 0.678$, $n = 32$, $P < 0.01$, 图 6(d)],该结果与盐沼土壤的研究结果一致^[53-55]. 这主要是由于 MAOC 是封闭或者吸附在微团聚体内部矿物上的有机质,而河口潮滩湿地土壤中的矿物主要分布在黏粒中^[56]. 因此,与粗粒土(如砂粒含量和黏粒含量)相比,细粒的黏土含量与河口潮滩湿地土壤中 MAOC 的相关性更高^[57]. 因此,淹水频率增加后,由于黏粒含量大量减少,因此导致河口潮滩湿地 MAOC 的含量也逐渐减少.

对土壤稳定性指数 CSI 的研究结果表明,在九龙江河口潮滩湿地,随着淹水频率的增加,土壤 CSI 增加 246%,土壤有机碳稳定性增强. 土壤 CSI 始终大于 1.00 (图 5),说明矿物结合态有机碳含量始终大于颗粒性有机碳含量,矿物结合态有机碳始终是九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳的主要赋存形态. 土壤 CSI 由红树林生境的 1.76 逐渐增加为光滩的 6.02,说明相较于微团聚体,大团聚体受淹水增加扰

动更为敏感^[56]. 因此,受大团聚体保护的、不稳定的 POC 首当其冲被破坏释放,损失远高于相对稳定的 MAOC,大团聚体有机碳逐渐向微团聚体转移,受微团聚体保护的 MAOC 则逐渐成为土壤有机碳固存的主要形式,土壤有机碳稳定性逐渐增强.

3.4 河口潮滩湿地生境、土壤碳库和稳定性对未来海平面上升的响应

20 世纪 60 年代以来,人类频繁的工业活动导致大气中温室气体浓度急剧增加,并引起全球气候变暖,最直接的后果之一为全球海平面上升^[58]. 仅 2006 ~ 2018 年间,海平面上升速率可达 $3.2 \sim 4.2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[59]. 海平面上升已成为 21 世纪人类面临的重大环境问题,九龙江河口潮滩湿地生境理化特征、土壤碳库、有机碳活性组分以及有机碳稳定性沿着

淹水梯度的变化见图 7. 本文预测未来海平面上升将对河口潮滩湿地土壤理化特征和蓝碳产生影响. 首先,河口潮滩湿地土壤理化性质将发生改变,土壤 pH 增加,氧化还原电位 ORP 减少,土壤中黏粒的含量也会随着海平面上升-淹水增加而减少. 其次,随着湿地植物生物量的减少,土壤 SOC 储量也随之减少. 有机碳的活性组分中,DOC 和 LOC 的占比会增加,而 MBC 的占比会减少. MBC 的占比减少也暗示着微生物丰度也会随着淹水频率的增加而减少. MAOC 是河口潮滩湿地最重要的有机碳赋存形式,随着海平面上升-淹水频率和程度的增加,MAOC 的占比将增加,土壤稳定性指数 CSI 增加,说明随着海平面上升(淹水增加)后,河口潮滩湿地土壤有机碳的稳定性将增加.

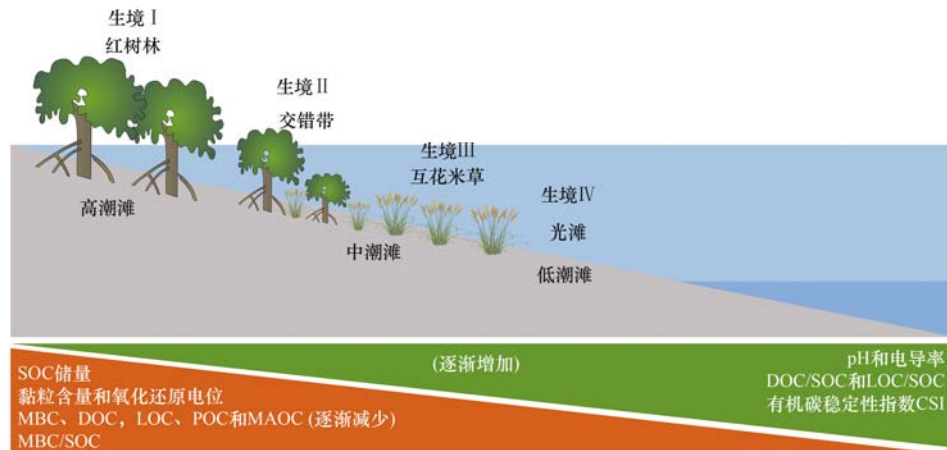


图 7 河口潮滩湿地有机碳储量、活性组分和稳定性指数沿淹水梯度分布

Fig. 7 Conceptual diagram of soil organic carbon storage, active components and carbon stability index along a flooding gradient in an estuarine tidal wetland

4 结论

(1) 淹水频率对河口潮滩湿地 SOC 储量有显著影响. 主要是由于淹水频率增加导致的植被生物量减少影响 SOC 储量.

(2) 随着淹水频率的增加,有机碳的活性组分溶解性有机碳(DOC)、微生物生物量碳(MBC)和易分解有机碳(LOC)均呈现减少的趋势,其中 DOC/SOC 和 LOC/SOC 增加,而 MBC/SOC 减少,说明活性组分中 DOC 和 LOC 的累积速率提高,而 MBC 的累积速率相对减少.

(3) 随着淹水频率的增加,颗粒性有机碳(POC)和矿物结合态有机碳(MAOC)也呈现减少的趋势,土壤 POC 的减少与 pH 的增加有关,土壤 MAOC 的减少与黏粒含量的减少有关.

(4) 随着淹水频率的增加,土壤有机碳稳定性指数 CSI 增加,矿物结合态有机碳(MAOC)是土壤有机碳的主要存在形态. 随着淹水频率的增加,土壤

有机碳稳定性指数会持续增大,土壤有机碳稳定性增强.

参考文献:

- [1] Duarte C M. Reviews and syntheses: hidden forests, the role of vegetated coastal habitats in the ocean carbon budget [J]. Biogeosciences, 2017, **14**(2): 301-310.
- [2] Doetterl S, Stevens A, Six J, *et al.* Soil carbon storage controlled by interactions between geochemistry and climate [J]. Nature Geoscience, 2015, **8**(10): 780-783.
- [3] Braun K N, Theuerkauf E J, Masterson A L, *et al.* Modeling organic carbon loss from a rapidly eroding freshwater coastal wetland [J]. Scientific Reports, 2019, **9**(1), doi: 10.1038/s41598-019-40855-5.
- [4] Spivak A C, Sanderman J, Bowen J L, *et al.* Global-change controls on soil-carbon accumulation and loss in coastal vegetated ecosystems [J]. Nature Geoscience, 2019, **12**(9): 685-692.
- [5] Benbi D K, Brar K, Toor A S, *et al.* Sensitivity of labile soil organic carbon pools to long-term fertilizer, straw and manure management in rice-wheat system [J]. Pedosphere, 2015, **25**(4): 534-545.
- [6] Bongiorno G, Bünemann E K, Oguejiofor C U, *et al.* Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management

- and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe [J]. *Ecological Indicators*, 2019, **99**: 38-50.
- [7] Culman S W, Snapp S S, Freeman M A, *et al.* Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, **76**(2): 494-504.
- [8] 徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 等. 桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1491-1503.
- Xu G P, Li Y Q, Shen Y Y, *et al.* Soil organic carbon distribution and components in different plant communities along a water table gradient in the Huixian Karst wetland in Guilin [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1491-1503.
- [9] 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3816-3824.
- Luo X H, Wang Z F, Lu C, *et al.* Effects of land use type on the content and stability of organic carbon in soil aggregates [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3816-3824.
- [10] 刘琪, 李宇虹, 李哲, 等. 不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2440-2448.
- Liu Q, Li Y H, Li Z, *et al.* Characteristics of paddy soil organic carbon mineralization and influencing factors under different water conditions and microbial biomass levels [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2440-2448.
- [11] Gattuso J P, Magnan A K, Bopp L, *et al.* Ocean solutions to address climate change and its effects on marine ecosystems [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2018, **5**, doi: 10.3389/fmars.2018.00337.
- [12] Mueller P, Grasse D, Nolte S, *et al.* Unrecognized controls on microbial functioning in blue carbon ecosystems: the role of mineral enzyme stabilization and allochthonous substrate supply [J]. *Ecology and Evolution*, 2020, **10**(2): 998-1011.
- [13] Chen L Y, Liu L, Qin S Q, *et al.* Regulation of priming effect by soil organic matter stability over a broad geographic scale [J]. *Nature Communications*, 2019, **10**(1), doi: 10.1038/s41467-019-13119-z.
- [14] Lugato E, Lavalley J M, Haddix M L, *et al.* Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter [J]. *Nature Geoscience*, 2021, **14**(5): 295-300.
- [15] Cotrufo M F, Ranalli M G, Haddix M L, *et al.* Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter [J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(12): 989-994.
- [16] Witzgall K, Vidal A, Schubert D I, *et al.* Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon [J]. *Nature Communications*, 2021, **12**(1), doi: 10.1038/s41467-021-24192-8.
- [17] Jagadamma S, Essington M E, Xu S T, *et al.* Total and active soil organic carbon from long-term agricultural management practices in West Tennessee [J]. *Agricultural & Environmental Letters*, 2019, **4**(1), doi: 10.2134/aes2018.11.0062.
- [18] Paul E A. The nature and dynamics of soil organic matter: plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **98**: 109-126.
- [19] Yuan G Y, Huan W W, Song H, *et al.* Effects of straw incorporation and potassium fertilizer on crop yields, soil organic carbon, and active carbon in the rice-wheat system [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, **209**, doi: 10.1016/j.still.2021.104958.
- [20] Wang C, Fang Y Y, An W L, *et al.* Acid rain mediated nitrogen and sulfur deposition alters soil nitrogen, phosphorus and carbon fractions in a subtropical paddy [J]. *CATENA*, 2020, **195**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104876.
- [21] Luo M, Zeng C S, Tong C, *et al.* Iron reduction along an inundation gradient in a tidal sedge (*Cyperus malaccensis*) marsh: the rates, pathways, and contributions to anaerobic organic matter mineralization [J]. *Estuaries and Coasts*, 2016, **39**(6): 1679-1693.
- [22] Bockelmann A C, Bakker J P, Neuhaus R, *et al.* The relation between vegetation zonation, elevation and inundation frequency in a Wadden sea salt marsh [J]. *Aquatic Botany*, 2002, **73**(3): 211-221.
- [23] Kirwan M L, Langley J A, Guntenspergen G R, *et al.* The impact of sea-level rise on organic matter decay rates in Chesapeake Bay brackish tidal marshes [J]. *Biogeosciences*, 2013, **10**(3): 1869-1876.
- [24] Langley J A, Mozdzer T J, Shepard K A, *et al.* Tidal marsh plant responses to elevated CO₂, nitrogen fertilization, and sea level rise [J]. *Global Change Biology*, 2013, **19**(5): 1495-1503.
- [25] Morris J T, Sundareshwar P V, Nietch C T, *et al.* Responses of coastal wetlands to rising sea level [J]. *Ecology*, 2002, **83**(10): 2869-2877.
- [26] Redelstein R, Dinter T, Hertel D, *et al.* Effects of inundation, nutrient availability and plant species diversity on fine root mass and morphology across a saltmarsh flooding gradient [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, **9**, doi: 10.3389/fpls.2018.00098.
- [27] Ishtiaq K S, Abdul-Aziz O I. Ecological parameter reductions, environmental regimes, and characteristic process diagram of carbon dioxide fluxes in coastal salt marshes [J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**, doi: 10.1038/s41598-020-72066-8.
- [28] Duarte C M, Losada I J, Hendriks I E, *et al.* The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation [J]. *Nature Climate Change*, 2013, **3**(11): 961-968.
- [29] Neubauer S C. Ecosystem Responses of a tidal freshwater marsh experiencing saltwater intrusion and altered hydrology [J]. *Estuaries and Coasts*, 2013, **36**(3): 491-507.
- [30] Tully K, Gedan K, Epanchin-Niell R, *et al.* The invisible flood: the chemistry, ecology, and social implications of coastal saltwater intrusion [J]. *BioScience*, 2019, **69**(5): 368-378.
- [31] 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): 1-43.
- [32] Kim K H, Michael H A, Field E K, *et al.* Hydrologic shifts create complex transient distributions of particulate organic carbon and biogeochemical responses in beach aquifers [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, **124**(10): 3024-3038.
- [33] 蔡锋, 黄敏芬, 苏贤泽, 等. 九龙江河口湾泥沙运移特点与沉积动力机制 [J]. *台湾海峡*, 1999, **18**(4): 418-418.
- Cai F, Huang M F, Su X Z, *et al.* Characteristics of silt movement and sedimentary dynamic mechanism in Jiulongjiang Estuary [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1999, **18**(4): 418-424.
- [34] 全球潮汐预报服务平台 [EB/OL]. <http://global-tide.nmdis.org.cn/>, 2021-08-16.
- [35] Chantigny M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: A review on the influence of land use and management practices [J]. *Geoderma*, 2002, **113**(3-4): 357-380.

- [36] Jenkinson D S, Brookes P C, Powlson D S. Measuring soil microbial biomass[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, **36** (1): 5-7.
- [37] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, **46**(7): 1459-1466.
- [38] Zhang M K, He Z L. Long-term changes in organic carbon and nutrients of an ultisol under rice cropping in Southeast China[J]. Geoderma, 2004, **118**(3-4): 167-179.
- [39] Więski K, Guo H Y, Craft C B, *et al.* Ecosystem functions of tidal fresh, brackish, and salt marshes on the Georgia coast[J]. Estuaries and Coasts, 2010, **33**(1): 161-169.
- [40] Li N, Shao T Y, Zhu T S, *et al.* Vegetation succession influences soil carbon sequestration in coastal alkali-saline soils in southeast China[J]. Scientific Reports, 2018, **8**(1), doi: 10.1038/s41598-018-28054-0.
- [41] 王红丽, 肖春玲, 李朝君, 等. 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, 2009, **28** (7): 1522-1528.
Wang H L, Xiao C L, Li C J, *et al.* Spatial variability of organic carbon in the soil of wetlands in Chongming Dongtan and its influential factors [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(7): 1522-1528.
- [42] 高灯州, 曾从盛, 章文龙, 等. 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, 2014, **28**(6): 216-221, 227.
Gao D Z, Zeng C S, Zhang W L, *et al.* Spatial distributions of soil organic carbon and active composition along a hydrologic gradient in Min River estuarine wetland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **28**(6): 216-221, 227.
- [43] Zhao X C, Rivera-Monroy V H, Farfan L M, *et al.* Tropical cyclones cumulatively control regional carbon fluxes in Everglades mangrove wetlands (Florida, USA) [J]. Scientific Reports, 2021, **11**, doi: 10.1038/s41598-021-92899-1.
- [44] Donnelly J P, Bertness M D. Rapid shoreward encroachment of salt marsh cordgrass in response to accelerated sea-level rise[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2001, **98**(25): 14218-14223.
- [45] Guan B, Zhang H X, Wang X H, *et al.* Salt is a main factor shaping community composition of arbuscular mycorrhizal fungi along a vegetation successional series in the Yellow River Delta [J]. CATENA, 2020, **185**, doi: 10.1016/j.catena.2019.104318.
- [46] 陈桂香, 高灯州, 陈刚, 等. 互花米草入侵对我国红树林湿地土壤碳组分的影响[J]. 水土保持学报, 2017, **31** (6): 249-256.
Chen G X, Gao D Z, Chen G, *et al.* Effects of *Spartina alterniflora* invasion on soil carbon fractions in mangrove wetlands of China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31** (6): 249-256.
- [47] 张雨雪, 胡伟芳, 罗敏, 等. 闽江口秋茄红树林凋落物产量及分解动态[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(4): 1312-1323.
Zhang Y X, Hu W F, Luo M, *et al.* Litter production and decomposition dynamics of *Kandelia obovata* from a mangrove swamp in Min River Estuary[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(4): 1312-1323.
- [48] Liao C Z, Luo Y Q, Fang C M, *et al.* Litter pool sizes, decomposition, and nitrogen dynamics in *Spartina alterniflora*-invaded and native coastal marshlands of the Yangtze Estuary [J]. Oecologia, 2008, **156**(3): 589-600.
- [49] 刘国华, 傅伯杰, 吴钢, 等. 环渤海地区土壤有机碳库及其空间分布格局的研究[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(9): 1489-1493.
Liu G H, Fu B J, Wu G, *et al.* Soil organic carbon pool and its spatial distribution pattern in the Circum Bohai Region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, **14**(9): 1489-1493.
- [50] 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]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2020, **20**(4): 537-547.
- [51] Rabbi S M F, Minasny B, McBratney A B, *et al.* Microbial processing of organic matter drives stability and pore geometry of soil aggregates [J]. Geoderma, 2020, **360**, doi: 10.1016/j.geoderma.2019.114033.
- [52] Avena M J, Koopal L K. Kinetics of humic acid adsorption at solid-water interfaces[J]. Environmental Science & Technology, 1999, **33**(16): 2739-2744.
- [53] 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): 1351-1362.
- [54] Bai J H, Zhang G L, Zhao Q Q, *et al.* Depth-distribution patterns and control of soil organic carbon in coastal salt marshes with different plant covers[J]. Scientific Reports, 2016, **6**(1), doi: 10.1038/srep34835.
- [55] Yang W, An S Q, Zhao H, *et al.* Impacts of *Spartina alterniflora* invasion on soil organic carbon and nitrogen pools sizes, stability, and turnover in a coastal salt marsh of eastern China [J]. Ecological Engineering, 2016, **86**: 174-182.
- [56] Kleber M, Bourg I C, Coward E K, *et al.* Dynamic interactions at the mineral-organic matter interface[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, **2**(6): 402-421.
- [57] Bucka F B, Pihlap E, Kaiser J, *et al.* A small-scale test for rapid assessment of the soil development potential in post-mining soils[J]. Soil and Tillage Research, 2021, **211**, doi: 10.1016/j.still.2021.105016.
- [58] Larsen L, Moseman S, Santoro A E, *et al.* A complex-systems approach to predicting effects of sea level rise and nitrogen loading on nitrogen cycling in coastal wetland ecosystems[A]. In: American Society of Limnology and Oceanography (Ed.). Ecological Dissertations in the Aquatic Sciences Symposium Proceedings VIII [M]. The American Society of Limnology and Oceanography, 2010. 67-92.
- [59] IPCC. IPCC Climate Change 2021: the physical science basis. The working group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2021. 5-6.

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)