

杭州湾湿地不同植被类型下土壤有机碳及其组分分布特征*

张文敏^{1,2} 吴明^{1†} 王蒙¹ 邵学新¹ 姜小三² 周斌³

(1 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 国家林业局杭州湾湿地生态系统定位观测研究站, 浙江富阳 311400)

(2 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(3 杭州师范大学理学院遥感与地球科学研究院, 杭州 311121)

摘要 土壤有机碳及其活性组分能够敏感地反映土壤碳库的变化。调查采集杭州湾自然滩涂湿地土壤样品(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm), 比较分析芦苇、互花米草、海三棱藨草、裸滩的土壤有机碳(SOC)、水溶性有机碳(DOC)、易氧化碳(ROC)和轻组有机质(LFOM)的变化。结果表明:(1)0~30 cm各土层, 芦苇、互花米草、海三棱藨草和裸滩的SOC平均含量依次为3.87~5.08 g kg⁻¹, 6.46~6.78 g kg⁻¹, 4.33~4.48 g kg⁻¹和4.99~5.25 g kg⁻¹, 互花米草SOC含量高于相同土层的其他类型;(2)互花米草DOC和LFOM平均含量分别为90.69~98.90 mg kg⁻¹, 2.35~2.95 g kg⁻¹, 高于相同土层的海三棱藨草、芦苇和裸滩, 而裸滩ROC含量(2.06~2.22 g kg⁻¹)却高于相同土层的其他三种类型;(3)芦苇、互花米草和海三棱藨草DOC占土壤有机碳的分配比例无显著性差异, 而相同土层的DOC占土壤有机碳的分配比例大小依次为裸滩>海三棱藨草>芦苇>互花米草;(4)SOC和DOC、ROC、LFOM、全氮(TN)、土壤含水量、pH之间均存在极显著关系($p < 0.01$), 各指标与pH之间均表现为负相关性。研究表明互花米草的入侵增强了滩涂湿地的固碳能力, 有机碳活性组分能够反映有机碳库的变化。

关键词 土壤有机碳; 活性有机碳; 轻组有机质; 植被类型; 杭州湾湿地

中图分类号 S153 **文献标识码** A

全球气候变暖及其影响是当前人类面临的最为严重的环境问题之一, 而土壤碳库在全球气候变化中扮演着重要角色^[1-2]。土壤碳库一般分为易分解的活性碳库和较稳定的惰性碳库^[3]。土壤有机活性碳库的变化能及时反映土壤有机碳库的周转和动态变化过程, 并能反映土地利用方式与管理措施等对土壤质量的影响, 对正确评价土壤的固碳效应和保证农业的可持续生产具有重要意义。同时, 在研究陆地生态系统碳循环过程及其影响因子时, 不仅要考虑土壤碳储量, 而且也应考虑土壤有机碳的组成及存在状态^[4]。土壤活性碳组分是指土壤中移动快、稳定性差、易氧化、矿化, 易被植物和土壤微生物利用的那部分有机碳^[5], 通常可用微生物量碳、易氧化碳、水溶性有机碳、颗粒有机碳等表征。虽然它只占土壤有机碳总量的较小部分, 但它

可以在土壤全碳变化之前反映土壤微小变化, 同时又直接参与土壤生物化学转化过程, 因而对土壤碳库平衡、土壤化学和生物化学肥力保持具有重要意义。

湿地是陆地表层重要的生态系统之一, 虽然面积仅占陆地表层的4%~6%, 但其有机碳储量约占陆地生态圈碳储量的20%~25%^[3]。湿地是碳重要的转化场所, 湿地土壤有机碳库的源、汇转换对气候变化的响应也极为敏感。目前, 不同研究区域纷纷开展对湿地碳组分的研究, 如董洪芳等^[6]研究了黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳, 了解该区域碱蓬湿地土壤有机碳中非保护性组分较低, 碳库相对稳定。钟春棋等^[7]对闽江口鱗鱼滩原生芦苇沼泽湿地进行了研究, 结果表明芦苇沼泽湿地受到人类活动影响后, 轻组物质含量和轻组有机碳含量均有

* 国家自然科学基金项目(31000296)、中国林科院亚热带林业研究所基本科研业务费(RISF61256)和杭州师范大学遥感与地球科学研究院开放基金项目(DDKF2011YG01)共同资助

† 通讯作者, E-mail: hangzhoubay@126.com

作者简介: 张文敏(1987—), 男, 安徽五河人, 硕士研究生, 主要从事土壤资源环境遥感与信息技术研究。E-mail: min_927@126.com

收稿日期: 2013-10-09; 收到修改稿日期: 2014-04-28

不同程度的减少,芦苇沼泽地的易氧化碳稳定性高。张文菊等^[8]研究了洞庭湖湿地土壤有机碳垂直分布特征,得出洞庭湖三类湿地间有机碳的分布与组成存在一定差异。纵观以往研究,各研究区根据当地特点从植被类型、土地利用方式等角度分别对湿地碳库进行了一系列研究并取得相应成果。

然而,当前我国关于河口滩涂湿地的碳库数据仍旧相对缺乏,湿地土壤有机碳活性组分研究较少,对揭示滩涂湿地碳素变化规律存在不足。杭州湾湿地是我国主要滨海湿地分布区之一,也是受人类活动影响最剧烈的湿地区域之一。因而,本研究基于对杭州湾滩涂湿地的调查与取样检测,以土壤有机碳、水溶性有机碳、易氧化碳和轻组有机质为测定指标,揭示杭州湾滩涂湿地不同植被类型下土壤有机碳及其活性组分的分布特征,旨在为理解杭州湾湿地土壤碳循环以及湿地生态保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区属于国家林业局杭州湾湿地生态系统定位观测研究站主观测区,位于浙江省慈溪市(120°55'~121°30'E,30°10'~30°42'N),是杭州湾滩涂淤涨最快的区段。滩涂湿地受潮水影响较大,该区域潮流属不正规半日潮流,为往复流性质,涨

潮历时6 h,落潮历时6.4 h,涨落潮流向几乎与海岸线平行。月平均潮位随季节变化,9月份最高、1月份最低,年变幅0.5 m。该地区多年平均气温为16.0℃,全年1月份最冷,平均气温为3.8℃,7月份最热,平均气温28.2℃。全年平均日照时数约为2 038 h,无霜期约为244 d,多年平均降水量为1 345 mm。土壤为长江水和浙江入海河流输沙和海底掀沙淤积而成,属于滨海盐土带。自然滩涂植被随高程的增加和滩涂形成时间的长短,伴有典型的自然生物群落演替序列,依次为裸滩、海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)和芦苇(*Phragmites australis*)生长区。此外,在海三棱藨草和芦苇生长区之间出现了入侵种互花米草(*Spartina alterniflora*)镶嵌群落。

1.2 采样方法

根据资料搜集和现场勘察,如图1所示,于2013年5月在离岸沙洲西北侧选取植被面积较大、植物长势较为一致的区域,依据不同植被类型芦苇、互花米草、海三棱藨草及裸滩布设4处样地。每个样地随机选取3块5 m×5 m样方,且样方间隔不小于10 m,每个样方按S形采集5个样点,利用Eijkkelkamp(荷兰)土壤取样器分别采集0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm深度的原状土层,同层土样5点混合带回实验室,共采集36份土样。剔除动、植物残体和石块,四分法取出适量土壤样品分成两部分,一部分放在4℃冰箱中保存,过2 mm孔径筛用于测定水溶性有机碳。另一部分风干处理,分别过

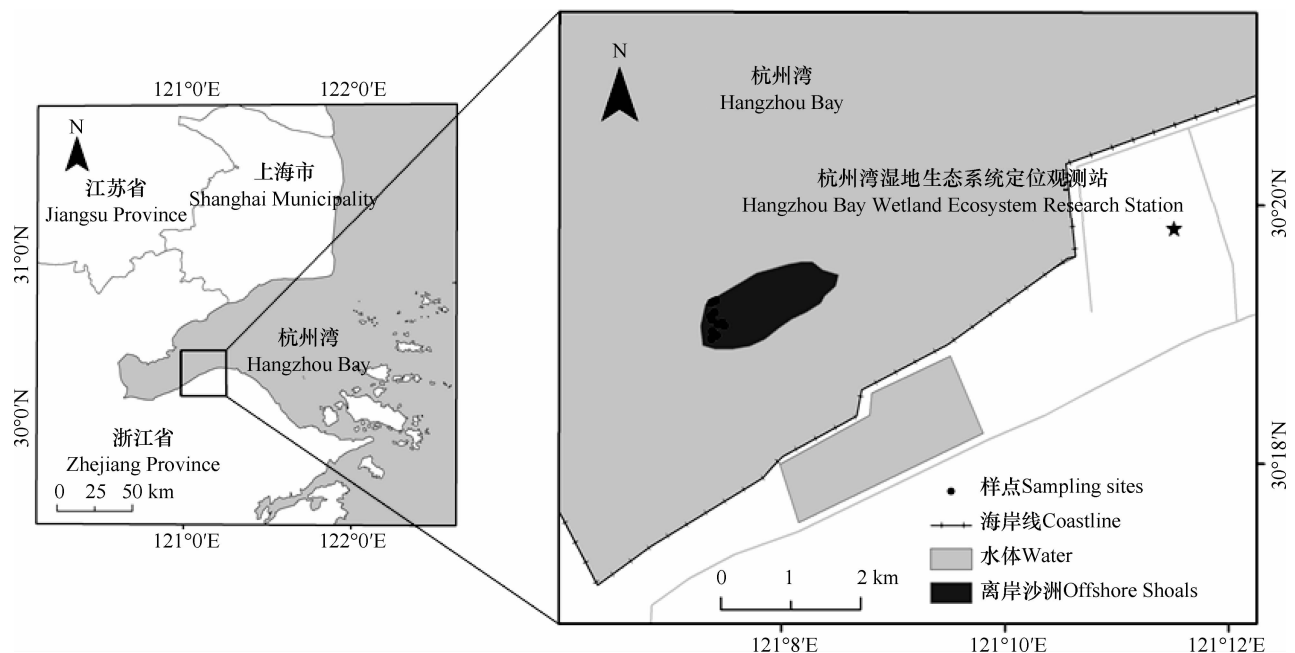


图1 研究区域地理位置

Fig. 1 Geographic location of the studied area

2 mm、0.25 mm 和 0.149 mm 孔径筛袋保存,用于测定 pH、电导率、土壤含水量,全氮,土壤有机碳、易氧化碳、轻组有机质。

1.3 样品处理与分析

土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾容量法—外加热法测定^[9];水溶性有机碳(DOC)^[10-11]测定方法为:称过 2 mm 筛鲜土 8 g,水土比为 5:1,经浸提、离心、抽滤等,滤液在岛津 TOC-VcpH 有机碳分析仪上直接测定。易氧化碳(ROC):采用 Blair 等^[12]提出的方法—KMnO₄氧化法测定,称取过 0.25 mm 筛的风干土 4 g,加 333 mmol L⁻¹的高锰酸钾溶液 25 ml,经振荡稀释,在分光光度计 565 nm 下进行比色。轻组有机质(LFOM)^[11,13]:将过 2 mm 筛的风干土样

10 g 放在 50 ml 的离心管中,加 40 ml 1.70 g ml⁻¹ NaI 重液,振荡 1 h,离心(1 000 r min⁻¹)10 min,上清液倾倒入装有 0.45 μm 滤膜的漏斗中抽滤,滤纸上的轻组用 0.01 mol L⁻¹CaCl₂和蒸馏水清洗,转入已称量的小玻璃杯中,离心管中的残余物重复上述过程 3 次,数次得到的轻组部分合在一起,60℃烘干称量,得到轻组有机质的质量,然后计算出轻组有机质的含量(轻组有机质质量占土壤质量的比例)。土壤全氮(TN)采用半微量开氏法测定,土壤 pH 和电导率分别采用 pH 计和电导率仪测定,土壤含水量采用烘干法测定^[9]。样点基本理化性质和分布如表 1 所示。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of the sampling sites

样地类型 Sample types	土层 Soil layer (cm)	经纬度 Latitude, Longitude	pH	电导率 Electric conductivity (mS cm ⁻¹)	土壤含水量 Soil moisture content (%)	样地描述 Site description
芦苇 <i>P. australis</i>	0~10	121°5'24"E	9.07	1.30	38	会受到高潮水侵袭,植被覆盖度 92%,生物量 3 990~4 269 g m ⁻²
	10~20	30°18'10.8"N	9.14	1.12	46	
	20~30		9.04	1.05	49	
互花米草 <i>S. alterniflora</i>	0~10	121°5'24"E	8.75	1.42	45	几乎不受潮水侵扰,嵌生在芦苇和互花米草之间,生物量 3 944 g m ⁻²
	10~20	30°18'7.2"N	8.78	1.20	46	
	20~30		8.64	1.34	52	
海三棱藨草 <i>S. mariqueter</i>	0~10	121°5'24"E	8.80	1.86	27	半日潮侵扰,植被覆盖度 61.5%,生物量 690.3~810.2 g m ⁻²
	10~20	30°18'14.4"N	8.94	1.40	37	
	20~30		9.12	1.27	40	
裸滩 Bare mudflat	0~10	121°4'48"E	8.91	1.98	39	半日潮侵扰
	10~20	30°18'25.2"N	8.98	1.75	43	
	20~30		8.96	1.53	42	

1.4 统计分析

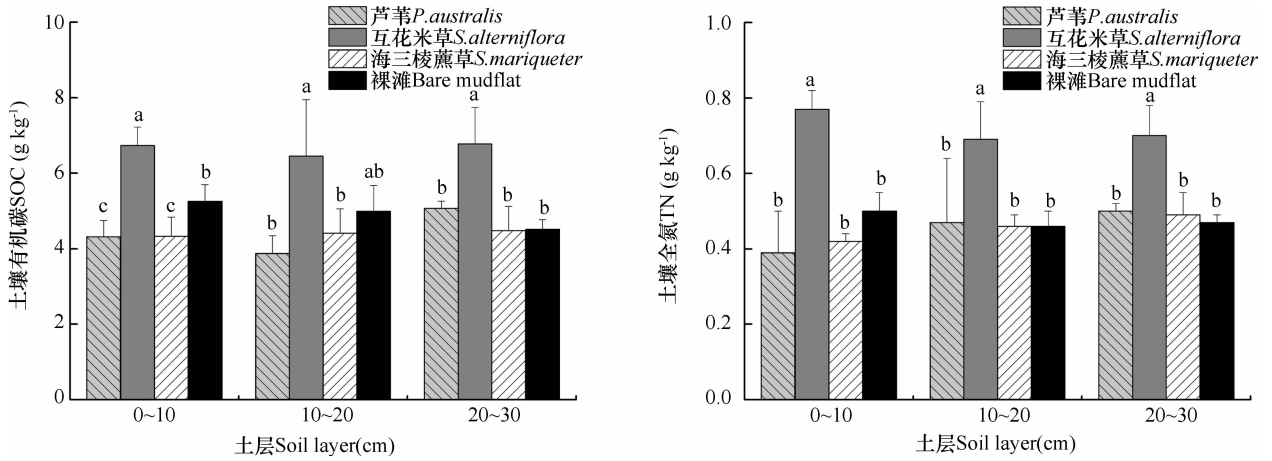
数据采用 Excel 进行整理及 SPSS 软件进行统计分析。采用 ArcGIS9.3 和 OriginPro8.5 绘图。

2 结果

2.1 自然滩涂湿地不同植被类型下土壤有机碳和全氮含量变化

不同植被类型下 SOC 和 TN 分布如图 2 所示,总体而言,芦苇、互花米草、海三棱藨草和裸滩 SOC 含量变化范围依次为 3.87~5.08 g kg⁻¹、6.46~6.78 g kg⁻¹、4.33~4.48 g kg⁻¹和 4.99~5.25 g kg⁻¹,其

中,互花米草 SOC 含量在各土层最高,并且在 0~10 cm 和 20~30 cm 土层显著高于其他三种类型($p < 0.05$)以及在 10~20 cm 土层显著高于芦苇和海三棱藨草。其次,裸滩 SOC 含量在 0~10 cm 土层显著高于芦苇和海三棱藨草;在 10~20 cm 和 20~30 cm 土层中,芦苇、海三棱藨草和裸滩 SOC 含量之间无显著性差异($p > 0.05$)。不同植被类型下土壤全氮含量与土壤有机碳含量变化趋于一致。互花米草土壤 TN 含量介于 0.69~0.77 g kg⁻¹之间,显著高于相同土层的芦苇、海三棱藨草和裸滩,并且此三种类型土壤 TN 含量介于 0.39 g kg⁻¹~0.50 g kg⁻¹之间,各相同土层之间 TN 含量差异不显著。



注:图中不同字母表示差异显著($p < 0.05$)下同 Note: Different letters mean significant difference ($p < 0.05$). The same below

图 2 不同植被类型下土壤有机碳和全氮分布特征

Fig. 2 Distribution of soil organic carbon and total nitrogen in soils under different vegetations

2.2 自然滩涂湿地不同植被类型下土壤有机碳活性组分变化

由图 3 可知,互花米草 DOC 含量在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层依次为 98.90 mg kg⁻¹、90.68 mg kg⁻¹,显著高于芦苇、海三棱藨草和裸滩,而在 20~30 cm 土层,互花米草和芦苇 DOC 含量差异不显著。其次,海三棱藨草和芦苇 DOC 含量在各相同土层中均无显著性差异。裸滩 DOC 含量变化范围为

50.53~52.58 mg kg⁻¹,在相同土层中含量最低。

由图 3 可以看出,裸滩 ROC 含量在 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土层依次为 2.06 g kg⁻¹、2.08 g kg⁻¹、2.22 g kg⁻¹,在各土层中含量最高,并显著高于芦苇和海三棱藨草。互花米草 ROC 含量介于 1.78~1.90 g kg⁻¹之间,高于相同土层的芦苇和海三棱藨草。芦苇和海三棱藨草之间 ROC 含量差异不显著,其平均含量变化范围分别为 1.28~1.50 g kg⁻¹、1.43~1.47 g kg⁻¹。

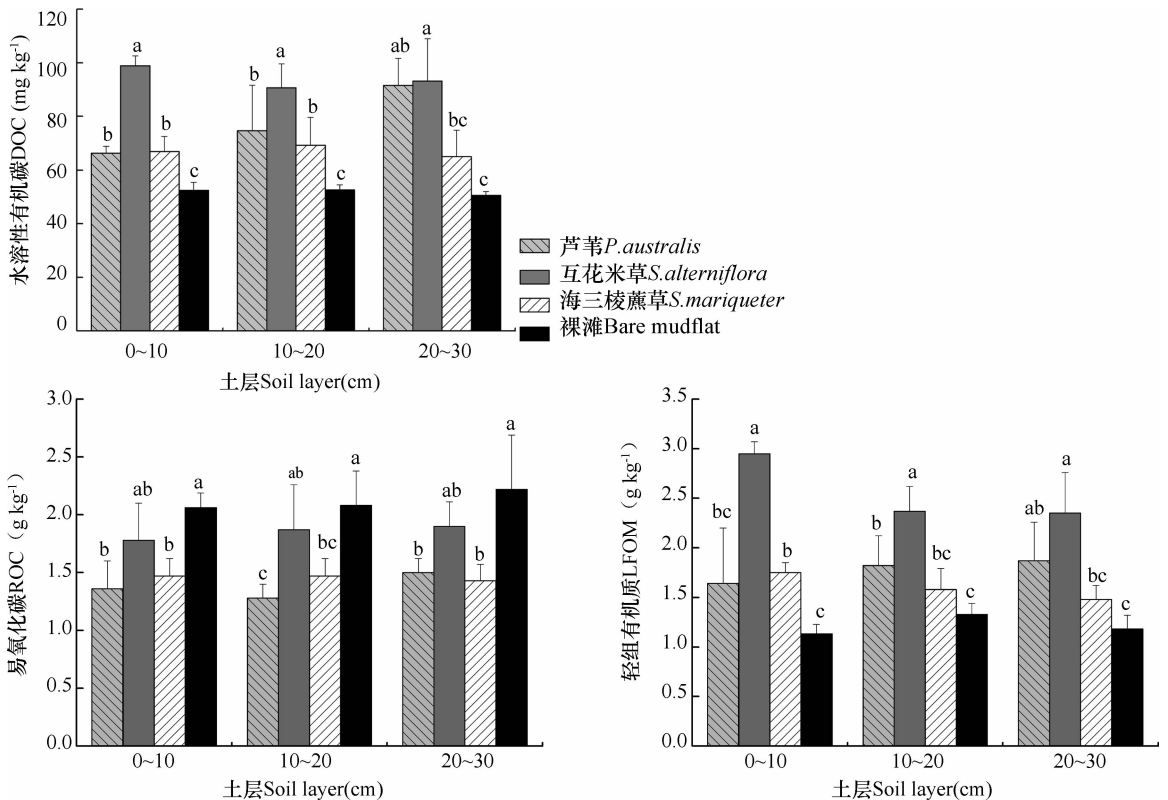


图 3 不同植被类型下土壤活性碳组分分布特征

Fig. 3 Distribution of labile carbon in soils under different types of vegetation

轻组有机质(LFOM)是按照密度法分离出来的,主要包括处于不同分解阶段的植物残体、小的动物和微生物,具有较高的周转速率,是土壤中不稳定有机碳的重要组成部分。由图3可知,互花米草 LFOM 含量在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层分别为 2.95 g kg⁻¹、2.37 g kg⁻¹,显著高于其他三种类型;而在 20~30 cm 土层,互花米草与芦苇 LFOM 含量差异不显著,但均显著高于海三棱藨草地和裸滩。裸滩 LFOM 含量变化范围介于 1.13~1.33 g kg⁻¹之间,在四种类型相同土层中含量最低。芦苇和海三棱藨草 LFOM 含量在相同土层中变化不显著。

2.3 不同活性碳组分占土壤有机碳的分配比例

土壤活性有机碳占土壤有机碳的分配比例能

够反映滩涂湿地植被对土壤碳行为的影响结果。由表2可以看出,在 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 相同土层中,芦苇、互花米草和海三棱藨草 DOC 占土壤有机碳的分配比例无显著性差异,但总体而言,芦苇土壤 DOC 分配比例相对较大,裸滩则最小。

ROC 与土壤有机碳比率能够反映土壤碳的稳定性。相同土层的 ROC 占土壤有机碳的分配比例大小依次为裸滩>海三棱藨草>芦苇>互花米草,且裸滩易氧化碳分配比例在 20~30 cm 土层中显著高于其他三种类型。芦苇、海三棱藨草和互花米草易氧化碳分配比例在各土层均无显著性差异,但互花米草易氧化碳分配比例在四种类型中最小。

表2 不同活性碳占土壤有机碳的分配比例

Table 2 Percentages of different fractions of labile carbon to SOC

样地类型 Sample types	水溶性有机碳占有机碳比例 DOC/SOC (%)			易氧化碳占有机碳比例 ROC/SOC (%)		
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
芦苇 <i>P. australis</i>	1.97(1.30) a	1.76(0.40) a	1.81(0.50) a	31.44(3.43) ab	31.20(10.56) a	29.51(2.78) b
互花米草 <i>S. alterniflora</i>	1.98(0.70) a	1.27(0.18) ab	1.40(0.38) ab	26.33(2.85) b	29.05(0.60) a	28.13(2.30) b
海三棱藨草 <i>S. mariqueter</i>	1.55(0.21) a	1.60(0.43) ab	1.45(0.21) ab	34.52(7.12) ab	34.19(8.19) a	31.87(3.04) b
裸滩 Bare mudflat	1.01(0.14) a	1.06(0.14) b	1.12(0.08) b	39.64(5.82) a	42.30(9.43) a	49.01(7.35) a

注:平均值(标准差),同列中不同字母表差异显著($p < 0.05$) Note: Means(SD), Different letters in the same column represent significant difference($p < 0.05$)

2.4 土壤有机碳及其活性组分与各指标的关系

由图4可以看出,土壤有机碳和水溶性有机碳、易氧化碳及轻组有机质之间均呈极显著正相关($p < 0.01$),水溶性有机碳与轻组有机质之间也表现为极显著正相关。这说明一方面土壤有机碳活性组分在很大程度上依赖土壤有机碳含量;另一方面也说明各有机碳活性组分之间关系密切,虽然它们的测定方法与表述等不同,但结果均能够反映出土壤有机碳的变化情况。其中,本研究中易氧化碳与各活性组分间相关性较弱,仅与土壤有机碳表现出极显著正相关性,此处需要更大量数据进一步论证此关系。

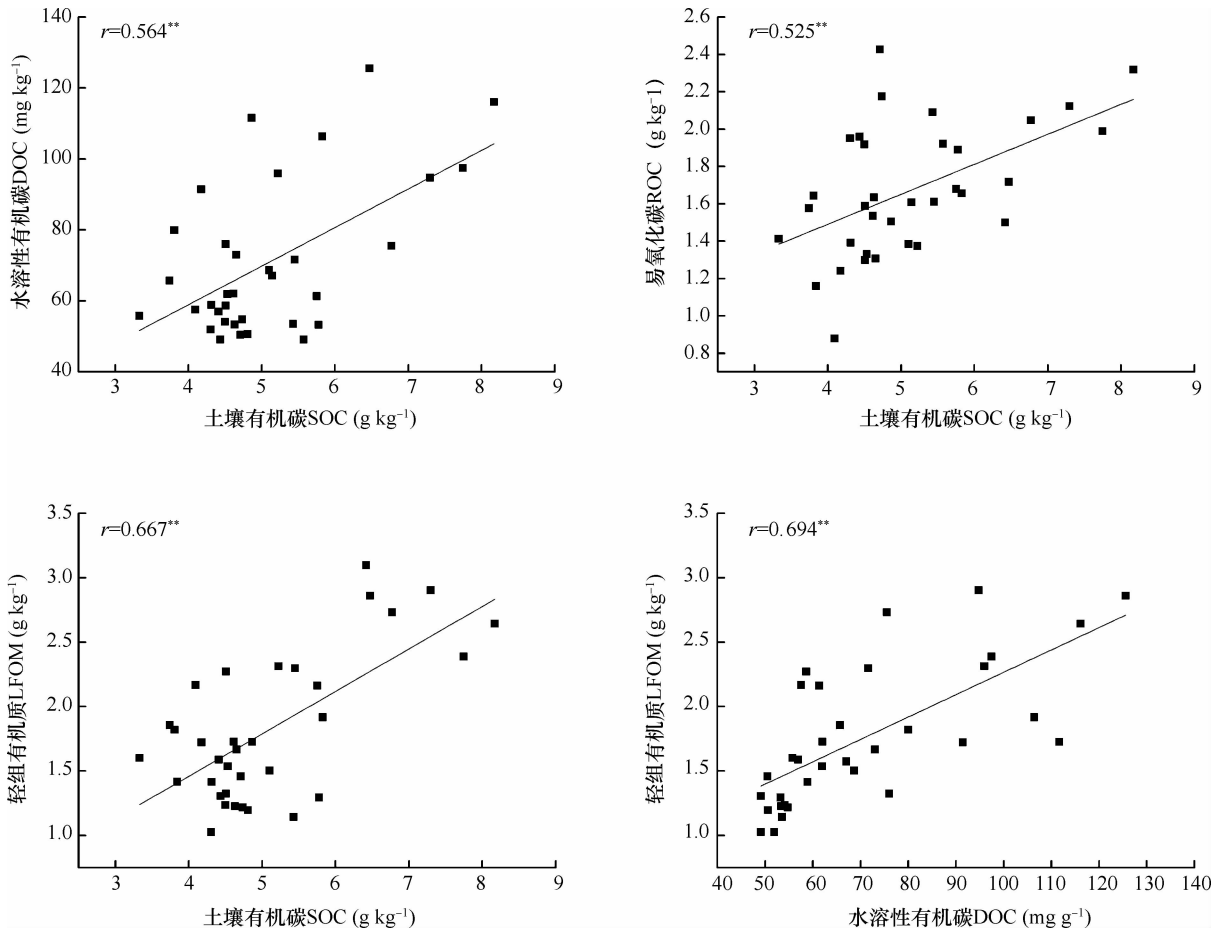
土壤有机碳及其活性组分与土壤理化性质相关性结果如表3所示,土壤有机碳与全氮和土壤含水量之间呈极显著正相关,与 pH 存在极显著负相关。DOC 与全氮和土壤含水量亦呈正相关,其中与全氮之间呈极显著正相关,与 pH 之间呈显著负相关。LFOM 与除碳氮比以外的各项指标均存在相关性,并且与全氮之间呈极显著正相关,与电导率和

pH 为极显著负相关。然而,易氧化碳与各项理化指标之间均未表现出显著相关性。

3 讨论

3.1 不同植被类型对湿地土壤有机碳及其活性组分的影响

土壤有机碳含量是土壤、气候、植被覆盖、人为干扰等各种因素综合影响下有机碳输入与输出之间动态平衡的结果^[14],因而不同植被类型下土壤有机碳输入输出也必然存在差异^[15-16]。研究表明,在 0~30 cm 各土层中互花米草土壤有机碳和全氮含量高于芦苇、海三棱藨草和裸滩,表明入侵种互花米草固碳能力超过本土植被,高建华等^[17]研究也有相类似结论,其解释为互花米草的生长和发育过程对潮滩淤涨起着控制作用,滩面的沉积速率较高,有利于营养物质的埋藏和保存,增加潮滩湿地有机碳的累积量;其次互花米草对整个潮滩湿地不同植被分布格局的改变也增加了土壤有机碳和全氮



注: ** 表示在 $p < 0.01$ 水平上极显著相关 Note: ** significant correlation at the 0.01 level

图4 土壤不同形态有机碳之间的关系

Fig. 4 Relationship between different fractions of soil organic carbon

表3 土壤有机碳及其活性组分与土壤理化性质的相关性

Table 3 Correlation between soil organic carbon and its labile components and soil physico-chemical properties

	pH	电导率 EC	全氮 TN	碳氮比 C/N	土壤含水量 Soil moisture content
土壤有机碳 SOC	-0.729 **	-0.035	0.795 **	0.056	0.481 **
水溶性有机碳 DOC	-0.384 *	-0.295	0.516 **	-0.224	0.373 *
易氧化碳 ROC	-0.180	0.217	0.289	-0.103	0.207
轻组有机质 LFOM	-0.526 **	-0.359 **	0.713 **	-0.260	0.333 *

注: ** 表示在 $p < 0.01$ 水平上显著相关; * 表示在 $p < 0.05$ 水平上显著相关 ** significant correlation at the 0.01 level; * significant correlation at the 0.05 level

在整个生态系统中的累积量;此外互花米草作为 C_4 植物,具有更强的光合速率及生产能力,通过枝叶和根系等枯萎凋落向土壤中输入大量有机质^[18-19]。与邵学新等^[20]早前对此区域有机碳研究(其研究结果为芦苇土壤有机碳含量最高)进行对比发现,虽然不同植被类型下土壤有机碳含量均有一定程度减少(造成这种差异的原因可能是采样

时间和季节的不同),但就本研究结果而言,互花米草下土壤有机碳含量最高,佐证了互花米草碳汇聚能力高于芦苇,如王宝霞等^[21]对闽江口入侵互花米草和芦苇下土壤有机碳研究也得出同样结论。然而,刘钰等^[22]对长江口九段沙盐沼湿地研究表明芦苇区的碳储存能力总体上高于互花米草区。造成上述研究结论不一致的主要原因可能是入侵

种互花米草的生长年限不同。如江苏滨海湿地互花米草入侵8~14 a,相对于当地碱蓬土壤(0~10 cm)有机碳和全氮分别增加了27%~69.6%,21.8%~55%^[18]。王刚等^[23]研究表明随着互花米草入侵年限的增加其向土壤中贡献的有机碳在持续增长,其研究还指出,互花米草入侵12 a,样地的年均碳汇率达 1.8 t hm^{-2} ,是中国农田碳汇率的12倍^[24],这对固碳研究具有重要意义,也肯定了入侵种互花米草的研究价值。因此,在判断互花米草与芦苇碳储存能力高低时需对其生长年限加以考虑。同时,入侵植物对碳循环及碳库的影响极为复杂,研究结论难以统一,因而需开展持续地深入研究以揭示入侵植物对地区生态系统的影响。此外,影响土壤有机碳的因素是多方面的,如与本研究相关的pH、全氮、土壤含水量、土壤含盐量等,这些理化性质的差异也不同程度的增加了土壤有机碳含量的不确定性,从而造成了研究结论的差异。裸滩土壤有机碳含量在0~10 cm和10~20 cm土层高于芦苇和海三棱藨草等地表,使得凋落物随潮水流失仅有少量残留在沉积物中,而部分凋落物亦可随潮水滚动滞留在裸滩上,最终归还土壤;其次,海源对裸滩有机碳也具有较高的贡献率^[25],裸滩碳氮比为10.35,据此推断其土壤有机碳可能来源于陆源和海源。

本研究表明,不同植被类型下水溶性有机碳和轻组有机质与土壤有机碳变化规律基本吻合,表现为互花米草下有机碳活性组分含量相对最高,芦苇和海三棱藨草活性组分含量差异不显著。一方面是因为土壤有机碳是影响其活性组分变化的主要因素^[26],Anderson等^[27]认为活性碳含量很大程度上决定于土壤有机碳总量;另一方面,水溶性有机碳主要来源于近期的植物枯枝落叶和土壤有机质中的腐殖质,不稳定、易淋失,轻组有机质主要包括处于不同分解阶段的植物残体、小的动物和微生物,具有较高的周转速率,易矿化,因此,这些活性组分的变化跟其自身特性以及受到的外界因素影响均有很大关系。然而,由于土壤有机碳活性组分对环境变化极为敏感,其各组分变化难以完全与土壤有机碳变化保持一致,如裸滩易氧化碳含量高于包括互花米草在内的其他三种类型。易氧化碳是土壤中容易被氧化的土壤活性有机碳组分,对植物和微生物均具有较高的可利用性^[12],从而可能导致植被下土壤易氧化碳被利用及分解较为强烈。

此外,研究较多的是关于有机碳活性组分含量受季节性变化的影响^[28-30],如季节性温度与湿度、微生物活性、新凋落物分解的差异等,这使得尽管在同一研究区,由于采样时间的差异,导致了有机碳活性组分发生明显改变。由此可见,土壤有机碳活性组分的变化会受到诸多因素的共同制约,研究土壤有机碳活性组分需充分考虑其影响因素的复杂性及多样性。

不同有机碳活性组分占土壤有机碳的分配比例能够更加充分反映滩涂湿地植被对土壤碳行为的影响。易氧化碳分配比例从有机碳自身分解特征方面指示有机碳活性强度,比值越大说明有机碳活性越强,被分解矿化的潜力越大。研究表明,互花米草、海三棱藨草和裸滩之间的易氧化碳分配比例无显著差异,然而互花米草易氧化碳分配比例最小,说明入侵种互花米草土壤有机碳活度低,有利于碳的积累。需注意的是,裸滩水溶性有机碳分配比例低于相同土层的互花米草、海三棱藨草和芦苇,而易氧化碳分配比例高于相同土层的其他三种类型。水溶性有机碳分配比例较低,说明裸滩由于潮水侵袭等作用,土壤水溶性有机碳易发生淋失,而易氧化碳所占比例高,则说明裸滩土壤有机碳被分解矿化的潜力大,其稳定性较差。

3.2 土壤有机碳及其活性组分、土壤理化性质相互关系

研究表明,土壤有机碳和水溶性有机碳、易氧化碳、轻组有机质等活性组分呈极显著正相关性,说明土壤有机碳活性组分的含量很大程度上取决于土壤有机碳的贮存量,这与马少杰等^[11]研究结果一致,也表明各活性碳相互之间关系密切,虽然表述、测定方法、来源和去向、影响因素等方面各异,但均从不同角度反映了土壤有机碳的动态特征。需注意到,本研究易氧化碳与除土壤有机碳以外各指标间均无显著相关性,这可能是由滩涂湿地复杂的环境因素如pH、土壤含盐量、潮水侵袭等差异造成,但对此有待于获取更多数据以进一步有效论证此关系。土壤有机碳及其活性组分均受到土壤pH不同程度的影响,且均表现为负相关性,表明适当降低pH有提高土壤有机碳及其活性组分含量的趋势,吴秀坤等^[31]对版纳河流域土地有机碳研究也得出类似结论,pH可以影响土壤中微生物种类、数量及活性,从而对活性碳组分的周转速率产生影响。全氮对土壤有机碳及其活性组分的影响主要是通过微生物连接起来,研究表明,全氮与土

壤有机碳、水溶性有机碳和轻组有机质之间均表现为极显著正相关,很多研究^[15,20]亦有同样结论,可见滩涂湿地土壤有机活性碳丰缺与土壤中氮素含量高低密切相关。

4 结 论

杭州湾自然滩涂湿地入侵种互花米草土壤有机碳及水溶性有机碳、轻组有机质含量最高;裸滩易氧化碳含量最高,其土壤有机碳稳定性较差易发生碳损失;不同植被类型下土壤有机碳活性组分含量变化各异,受土壤有机碳及诸多环境因素共同影响,但同时各组分关系又极为密切,均能够从不同角度反映滩涂湿地土壤有机碳的动态特征。

参 考 文 献

- [1] IPCC. Climate change 2001: The scientific basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- [2] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家安全. 地球科学进展, 2005, 20(4): 384—393. Pan G X, Zhao Q G. Study on evolution of organic carbon SOC in agricultural soils of China: Facing the challenge of global change and food security(In Chinese). Advances in Earth Science, 2005, 20(4): 384—393
- [3] Parish F, Looi C C. Wetlands, biodiversity and climate change. Opinions and needs for enhanced linkage between the Ramsar conventions on wetland. Convention on biological diversity and UN framework convention on climate change. Tokyo, 1999
- [4] 王淑平, 周广胜, 高素华, 等. 中国东北样带土壤活性有机碳的分布及其对气候变化的响应. 植物生态学报, 2003, 27(6): 780—785. Wang S P, Zhou G S, Gao S H, et al. Distribution of soil labile carbon along the northeast China transect (NECT) and its response to climatic change(In Chinese). Acta Phytocologica Sinica, 2003, 27(6): 780—785
- [5] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. European Journal of Soil Science, 2001, 52: 345—353
- [6] 董洪芳, 于君宝, 管博. 黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征. 环境科学, 2013, 34(1): 288—292. Dong H F, Yu J B, Guan B. Distribution characteristics of soil organic carbon and its composition in *Suaeda salsa* Wetland in the Yellow River Delta (In Chinese). Environmental Science, 2013, 34(1): 288—292
- [7] 钟春棋, 曾从盛, 全川. 不同土地利用方式对闽江口湿地土壤活性有机碳的影响. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5(4): 65—70. Zhong C Q, Zeng C S, Tong C. Impacts of land-use on soil labile organic carbon contents in the Min River Estuary Wetlands(In Chinese). Journal of Subtropical Resources and Environment, 2010, 5(4): 65—70
- [8] 张文菊, 彭佩钦, 童成立, 等. 洞庭湖湿地有机碳垂直分布与组成特征. 环境科学, 2005, 26(3): 56—60. Zhang W J, Peng P Q, Tong C L, et al. Characteristics of distribution and composition of organic carbon in Dongting Lake floodplain (In Chinese). Environmental Science, 2005, 26(3): 56—60
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods for soil agrochemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [10] Martin H C. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: A review on the influence of land use and management practices. Geoderma, 2003, 113: 357—380
- [11] 马少杰, 李正才, 王斌, 等. 不同经营类型毛竹林土壤活性有机碳的差异. 生态学报, 2012, 32(8): 2603—2611. Ma S J, Li Z C, Wang B, et al. Changes in soil active organic carbon under different management types of bamboo stands (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(8): 2603—2611
- [12] 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. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46: 1459—1466
- [13] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 1799—1806
- [14] Solomon D, Lehmann J, Kinyangi J, et al. Long-term impacts of anthropogenic perturbations on dynamics and speciation of organic carbon in tropical forest and subtropical grassland ecosystems. Global Change Biology, 2007, 13: 511—530
- [15] 石福臣, 李瑞利, 王绍强, 等. 三江平原典型湿地土壤剖面有机碳及全氮分布与积累特征. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1425—1431. Shi F C, Li R L, Wang S Q, et al. Profile distribution and accumulation characteristics of organic carbon and total nitrogen in typical marshes in Sanjiang Plain (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(7): 1425—1431
- [16] 向成华, 栾军伟, 骆宗诗, 等. 川西沿海海拔梯度典型植被类型土壤活性有机碳分布. 生态学报, 2010, 30(4): 1025—1034. Xiang C H, Luan J W, Luo Z S, et al. Labile soil organic carbon distribution on influenced by vegetation types along an elevation gradient in west Sichuan, China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(4): 1025—1034
- [17] 高建华, 杨桂山, 欧维新. 互花米草引种对苏北潮滩湿地 TOC、TN 和 TP 分布的影响. 地理研究, 2007, 26(4): 799—808. Gao J H, Yang G S, Ou W X. The influence after introduction of *Spartina alterniflora* on the distribution of TOC, TN and TP in the national Yancheng rare birds nature reserve, Jiangsu Province, China (In Chinese). Geographical Research, 2007, 26(4): 799—808
- [18] Zhang Y H, Ding W X, Luo J F, et al. Changes in soil organic carbon dynamics in an Eastern Chinese coastal wetland following invasion by a C₄ plant *Spartina alterniflora*. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42(10): 1712—1720

- [19] Cheng X L, Luo Y Q, Chen J Q, et al. Short-term C_4 plant *Spartina alterniflora* invasions change the soil carbon in C_3 plant-dominated tidal wetlands on a growing estuarine island. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 3380—3386
- [20] 邵学新, 杨文英, 吴明, 等. 杭州湾滨海湿地土壤有机碳含量及其分布格局. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 658—664. Shao X X, Yang W Y, Wu M, et al. Soil organic carbon content and its distribution pattern in Hangzhou Bay coastal wetlands (In Chinese). *Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 658—664
- [21] 王宝霞, 曾从盛, 陈丹, 等. 互花米草入侵对闽江河口芦苇湿地土壤有机碳的影响. *中国水土保持科学*, 2010, 8(5): 114—118. Wang B X, Zeng C S, Chen D, et al. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on soil organic carbon in the *Phragmites australis* estuary wetlands of Minjiang River (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(5): 114—118
- [22] 刘钰, 李秀珍, 闫中正, 等. 长江口九段沙盐沼湿地芦苇和互花米草生物量及碳储量. *应用生态学报*, 2013, 24(8): 2129—2134. Liu Y, Li X Z, Yan Z Z, et al. Biomass and carbon storage of *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* in Jiudu Shoal Wetland of Yangtze Estuary, East China (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(8): 2129—2134
- [23] 王刚, 杨文斌, 王国祥, 等. 互花米草海向入侵对土壤有机碳组分、来源和分布的影响. *生态学报*, 2013, 33(8): 2474—2483. Wang G, Yang W B, Wang G X, et al. The effects of *Spartina alterniflora* seaward invasion on soil organic carbon fractions, sources and distribution (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(8): 2474—2483
- [24] Xie Z B, Zhu J G, Liu G, et al. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. *Global Change Biology*, 2007, 13(9): 1989—2007
- [25] 高建华, 杨桂山, 欧维新. 苏北潮滩湿地不同生态带有有机质来源辨析与定量估算. *环境科学*, 2005, 26(6): 51—56. Gao J H, Yang G S, Ou W X. Analyzing and quantitatively evaluating the organic matter source at different ecologic zones of tidal saltmarsh, North Jiangsu Province (In Chinese). *Chinese Journal of Environmental Science*, 2005, 26(6): 51—56
- [26] 廖洪凯, 龙健, 李娟. 土地利用方式对喀斯特山区土壤养分及有机碳活性组分的影响. *自然资源学报*, 2012, 27(12): 2081—2090. Liao H K, Long J, Li J. Effects of different land use patterns on soil nutrients and soil active organic carbon components in Karst Mountain Area (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(12): 2081—2090
- [27] Anderson T H, Domsch K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 1989, 21: 471—479
- [28] 孔范龙, 郗敏, 吕宪国, 等. 三江平原环型湿地土壤溶解性有机碳的时空变化特征. *土壤学报*, 2013, 50(4): 847—852. Kong F L, Xi M, Lü X G, et al. Spatial and temporal variation of dissolved organic carbon in soils of annular wetlands in Sanjing Plain, China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 847—852
- [29] 王国兵, 赵小龙, 王明慧, 等. 苏北沿海土地利用变化对土壤易氧化碳含量的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 921—926. Wang G B, Zhao X L, Wang M H, et al. Effects of land use change on soil readily oxidizable carbon in a coastal area of northern Jiangsu Province, East China (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(4): 921—926
- [30] 谢锦升, 杨玉盛, 杨智杰, 等. 退化红壤植被恢复后土壤轻组有机质的季节动态. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 557—563. Xie J S, Yang Y S, Yang Z J, et al. Seasonal variation of light fraction organic matter in degraded red soil after vegetation restoration (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(3): 557—563
- [31] 吴秀坤, 李永梅, 李朝丽, 等. 纳版河流域土地利用方式对土壤有机碳以及活性有机碳的影响. *生态环境学报*, 2013, 22(1): 6—11. Wu X K, Li Y M, Li C L, et al. Effects of land use type on soil total organic carbon and soil labile organic carbon in Naban River watershed (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(1): 6—11

DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF ORGANIC CARBON AND ITS COMPONENTS IN SOILS UNDER DIFFERENT TYPES OF VEGETATION IN WETLAND OF HANGZHOU BAY

Zhang Wenmin^{1,2} Wu Ming^{1†} Wang Meng¹ Shao Xuexin¹ Jiang Xiaosan² Zhou Bin³

(1 Wetland Ecosystem Research Station of Hangzhou Bay, State Forestry Administration, Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang, Zhejiang 311400, China)

(2 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(3 Institute of Remote Sensing and Earth Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China)

Abstract Soil organic carbon and its labile components are sensitive indicators of changes in soil carbon pool. Therefore, the study on soil organic carbon and its labile components is of great significance to the research of global climate change. A field survey was carried out of tidal flats and natural wetlands in Hangzhou Bay with samples of soils at <http://pedologica.issas.ac.cn>

0 ~ 10 cm, 10 ~ 20 cm, 20 ~ 30 cm in depth collected for analysis of changes in soil organic carbon (SOC), soil dissolved organic carbon (DOC), soil readily oxidizable carbon (ROC) and light fraction organic matter (LFOM) in bare mudflat and mudflats under *Phragmites australis*, *Spartina alterniflora* and *Scirpus mariqueter*, and relationships between various fractions of organic carbon and soil physico-chemical properties. Results indicate that (1) the mean SOC content in soils of the three soil layers was 3.87 ~ 5.08 g kg⁻¹, 6.46 ~ 6.78 g kg⁻¹, 4.33 ~ 4.48 g kg⁻¹ and 4.99 ~ 5.25 g kg⁻¹ in mudflat under *Phragmites australis*, *Spartina alterniflora*, and *Scirpus mariqueter*, and bare mudflat; the mudflat under *Spartina alterniflora* was the highest and followed by bare mudflat in mean SOC content; soil TN and SOC varied in a similar trend, regardless of vegetation; (2) The mudflat under *Spartina alterniflora* was the highest in mean DOC and LFOM content, being 90.69 ~ 98.90 mg kg⁻¹ and 2.35 ~ 2.95 g kg⁻¹ respectively, while the bare mudflat the lowest, however, the bare mudflat was the highest in mean ROC content, being 2.06 ~ 2.22 g kg⁻¹; (3) No significant difference was observed between the mudflats under *Phragmites australis*, *Spartina alterniflora*, and *Scirpus mariqueter* in DOC/SOC ratio, but in ROC/SOC ratio, a decreasing order was found of bare mudflat > mudflat under *Scirpus mariqueter* > mudflat under *Phragmites australis* > mudflat under *Spartina alterniflora*; (4) SOC was significantly and positively related to DOC, ROC and LFOM; Besides, SOC was also significantly and positively related to TN and soil moisture content; but all the SOC fractions were negatively related to soil pH ($p < 0.01$). All the findings indicate that the invasion of *Spartina alterniflora* is not so bad because the plants help enhance wetlands' carbon sequestration capacity, and the labile fractions of organic carbon are good indicators of changes in soil organic carbon pool in wetlands.

Key words Soil organic carbon; Labile organic carbon; Light fraction organic matter; Vegetation types; Hangzhou Bay Wetland

(责任编辑:檀满枝)